

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektrotechniky

Název Diplomové práce

Návrh generátoru s permanentními magnety pro malou větrnou
elektrárnu

Design of Generator with Permanent Magnets for Small Wind Power
Plant

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Pospíšil**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh generátoru s permanentními magnety pro malou větrnou elektrárnu**
Design of Generator with Permanent Magnets for Small Wind Power Plant

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor stroje s permanentními magnety
3. Navrhněte základní geometrické uspořádání generátoru a jeho základní parametry
2. Vytvořte numerický model generátoru s permanentními magnety
3. Proveďte elektromagnetickou analýzu generátoru a stanovte základní charakteristiky
4. Výsledky analýzy vyhodnoťte
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- GIERAS, F., Jacek. Permanent magnet Motor Technology, New York, Marcel Dekker, Inc., 2002
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Podpis:

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce ing. Petru Kačorovi, Ph.D za jeho vstřícnost a cenné rady jež jsem využil při nastavování simulací, za pomoc s hledáním literatury a celkově velkou trpělivostí.

Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Podpis:

Datum:

Abstrakt

Cílem diplomové práce je vytvoření modelu a simulace axiálního generátoru dle skutečné předlohy a analýza simulací. Dále provedení optimalizačních úprav magnetického obvodu stroje jejich simulace a zhodnocení. Práce obsahuje základní popis a rozdělení synchronních strojů. Popisuje materiály používané pro výrobu synchronních strojů s permanentními magnety, jejich rozdělení a konstrukci. Dál ukazuje postup při tvorbě modelu a srovnání dat s předlohou. Na základě vytvořeného modelu v programu Ansys Maxwell jsou pak provedeny optimalizace magnetického obvodu a jejich zhodnocení.

Klíčová slova

Axiální generátor, synchronní generátor, permanentní magnety, stroje s permanentními magnety, konstrukce, model, Ansys Maxwell, optimalizace magnetického obvodu.

Abstract

The goal of this diploma thesis is creation a model and simulation of axial generator based on the real machine also with analysis of simulations. Also contains execution of optimization adjustment of magnetic circuit of machine with simulation and analysis. Theoretical part of my thesis deals with basic description and distribution of synchronous machines. I mention materials which are used for manufacturing synchronous machines with permanent magnets also with construction and distribution. This work shows procedure in creation of model and comparison datas with exemplar. Optimizations of magnetic circuit is based on virtual model which I made in program Ansys Maxwell also with analysis of results.

Key Words

Axial generator, synchronous generator, permanent magnets, machines with permanent magnets, construction, model, Ansys Maxwell, optimization of magnetic circuit

Seznam symbolů a zkratk:

ω_s	úhlová rychlost statoru [$rad \cdot s^{-1}$]
f	frekvence napájecího proudu [Hz]
p	počet pár pólů [-]
β	zátěžný úhel [rad]
n	otáčky [ot/min^{-1}]
U_i	indukované napětí [V]
N_l	počet závitů jedné fáze [-]
k_{vl}	činitel vinutí statoru [-]
f_l	kmitočet [Hz]
Φ	magnetický tok [Wb]
B	magnetická indukce [T]
H	intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
F_m	magnetometrické napětí [A]
l	střední délka siločáry magnetického pole [m]
μ	permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]
μ_0	permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$]
μ_r	permeabilita relativní [$H \cdot m^{-1}$]
B_r	remanence [T]
H_c	koercivita [$A \cdot m^{-1}$]
ω_s	synchronní rychlost [$rad \cdot s^{-1}$]
U_S	svorkové napětí [V]
U_{ib}	indukované napětí [V]
R	odpor vinutí [Ω]
I	proud [A]
l_v	délka vodiče pod magnetem [m]
$L \times W \times T$	rozměry magnetu -délka, šířka, tloušťka [mm]
D_{out}	průměr rotoru [m]
t_{rot}	tloušťka rotoru [m]
D_{Mavg}	střední průměr uložení magnetů na rotoru [m]
n_{rot}	jmenovité otáčky rotoru [ot/min^{-1}]

N_{cv}	počet závitů v jedné cívice [-]
S_1	počet cívek [-]
m	počet fází [-]
δ	velikost vzduchové mezery [mm]
Q_p	počet drážek na pól [-]
V_M	objem magnetu [m ³]
B_δ	indukce ve vzduchové mezeře [T]
V_δ	objem vzduchové mezery [m ³]
B_M	magnetická indukce magnetu [T]
H_M	intenzita magnetu [A·m ⁻¹]
S_δ	plocha vzduchové mezery [m ²]
R_{out}	vnější poloměr rotoru [m]
R_{in}	vnitřní poloměr rotoru [m]
ϕ_{max}	maximální magnetický tok [Wb]
ϕ_δ	magnetický tok ve vzduchové mezeře [Wb]
U_{ef}	efektivní napětí [V]
l_{vin}	délka vinutí [m]
l_{zav}	délka jednoho závitu [m]
R_{vin}	odpor vodiče při 20°C [Ω]
ρ_{Cu}	rezistivita mědi [Ω·m ² ·m ⁻¹]
S_v	plošný průřez vodiče [m ²]
R_{40}	odpor vodiče při 40°C [Ω]
α_{Cu}	teplotní součinitel odporu mědi [K ⁻¹]
R_c	celkový odpor vinutí [Ω]
φ	účinník [-]
P	výkon [W]
P_p	příkon generátoru [W]
M	točivý moment [Nm]
η	účinnost [-]

Obsah

1. Úvod	1
2. Synchronní stroje	2
2.1. Historie.....	2
2.2. Princip	3
2.3. Rozdělení generátorů	4
2.3.1. Turboalternátory.....	5
2.3.2. Hydroalternátory	6
3. Magnetické materiály.....	7
3.1 Úvod do magnetizmu.....	7
3.1.1. Veličiny popisující magnetické pole.....	7
3.1.2. Látky rozdělené podle poměrné permeability.....	8
3.1.3. Hodnocení vlastností magnetických materiálů.....	9
3.2. Materiály permanentních magnetů.....	10
3.2.1. AlNiCo	10
3.2.2. Ferity	11
3.2.3. SmCo	12
3.2.4. NdFeB.....	12
3.2.5. Vliv teploty	13
3.2.6. Maximální energetický součin $(BH)_{\max}$	14
3.3. Magneticky měkké materiály.....	14
3.3.1. Magneticky měkká ocel	14
3.3.2. Magneticky měkké práškové materiály	15
4. Synchronní stroje s permanentními magnety	16
4.1. Radiální stroj s permanentními magnety.....	17
4.2. Axiální stroj s permanentními magnety.....	18
4.2.1. Úvod do axiálních strojů	18
4.2.2. Jednostranné stroje	20
4.2.3. Oboustranné stroje s rotorem uprostřed	20
4.2.4. Oboustranné stroje se statorem uprostřed.....	21
4.3. Konstrukce a výroba	21
4.3.1. Stator	21
4.3.2. Rotor	23

4.3.3.	Vinutí.....	23
4.4.	Výpočet	24
5.	Model axiálního generátoru	28
5.1.	Konstrukce simulovaného generátoru	28
5.2.	SolidWorks	29
5.3.	Ansys Maxwell	31
5.4.	Porovnání modelu se skutečným generátorem.....	33
5.4.1.	Napětí na prázdkno	33
5.4.2.	Proud na krátko	35
5.4.3.	Měření při odporové zátěži.....	37
5.5.	Optimalizace	43
5.5.1.	Změna velikosti vzduchové mezery	43
5.5.3.	Změna tvaru magnetu.....	52
6.	Závěr	61
	Použitá literatura	62
	Seznam obrázků	64
	Seznam tabulek.....	66
	Seznam grafů	67
	Seznam příloh	68

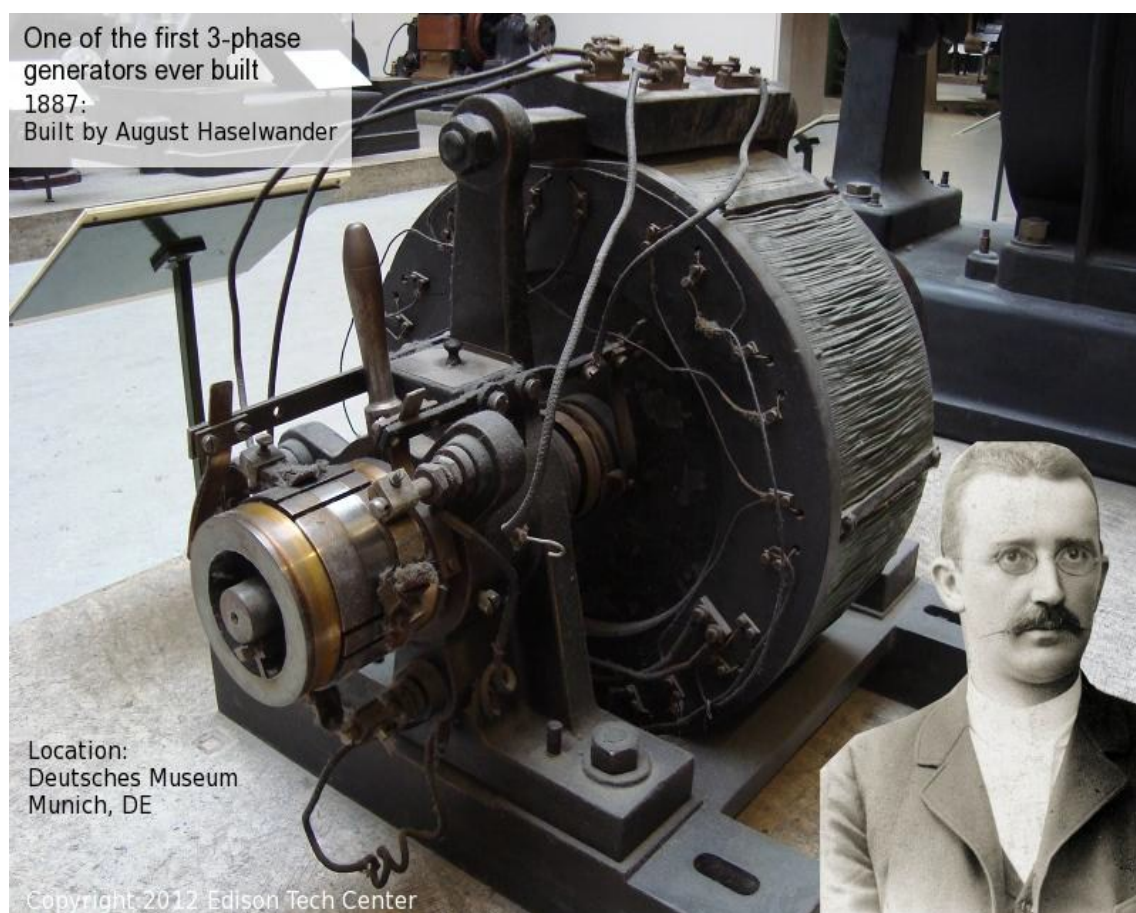
1. Úvod

V dnešní době roste zájem o obnovitelné zdroje, zejména velká pozornost v této oblasti je věnována větrné energii. Tyto elektrárny pro malé výkony vyžadují od generátorů elektrické energie nízké náklady, mechanickou jednoduchost, vysokou spolehlivost a efektivitu. Kvalitní návrh generátoru představuje velké časové a výpočtové nároky na konstruktéry a to se projevuje i ceně strojů. Pro snížení nákladů a zvýšení efektivitu při návrhu stroje se v současnosti používá softwarů pro vytvoření a analýzu modelu, programy založených především na metodě konečných prvků. Tyto programy budou využity také v této práci pro vytvoření modelu axiálního stroje s permanentními magnety a jeho optimalizaci. Právě axiální stroje mají velké výhody proti ostatní druhům strojů při aplikacích spojených s využitím obnovitelných zdrojů, zvláště v oblasti malých výkonů. Zájem o tyto stroje podnítil rozvoj výkonných permanentních magnetů, jejichž popis a vlastnosti jsou v práci obsaženy. Práce se také věnuje konstrukci a popisu vlastností axiálních strojů mezi, které patří větší hustota výkonu, velká spolehlivost a efektivita. Předmětem práce je vytvoření modelu skutečného generátoru v softwarovém prostředí a porovnání nasimulovaných hodnot se skutečnými, jež byly změřeny v pracích [6] a [19]. Poté bude model použit pro návrh optimalizačních změn a jejich zhodnocení.

2. Synchronní stroje

2.1. Historie

Počátky synchronních strojů jsou datovány již do devadesátých let 19. století. Jak Nikola Tesla uvádí ve svých spisech, tak ho v roce 1882 napadla myšlenka točivého magnetického pole, na jejímž základě poté sestrojil první fungující asynchronní stroj. Po té přišel v roce 1888 patent na dvoufázový a třífázový motor, dále následovalo velké množství patentů souvisejících s přenosem střídavé elektrické energie a patentu na synchronní motor. Za počátek synchronních generátorů lze považovat vynález trojfázového synchronního generátoru (obr. 2.1) z roku 1887, jehož autorem je F. August Haselwander. Generátor dosahoval výkonu $P=2,8 \text{ kW}$ při 960 ot/min měl tedy frekvenci $f=32 \text{ Hz}$. Tento generátor je umístěn v Mnichově v muzeu. Pro rozvoj synchronních generátorů byl významný vysokonapěťový přenos elektrické energie na mezinárodní výstavu ve Frankfurtu z Lauffen am Neckar. [13]



Obr. 2. 1 První komerční 3 fázový generátor [13]

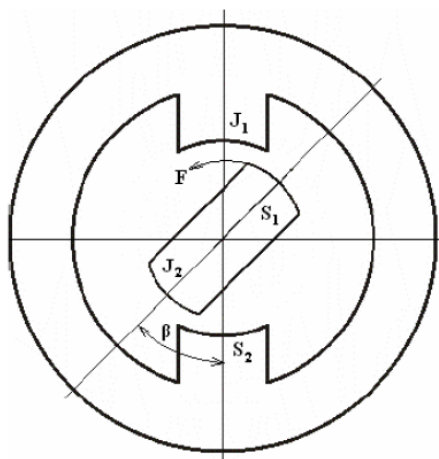
2.2. Princip

Synchronní stroj stejně jako všechny točivé stroje pracuje na principu točivého magnetického pole, jenž vytváří zpravidla třífázové vinutí. Označení synchronní stroj plyne z faktu, že rotor má stejnou rychlost otáčení jako magnetického pole statoru. Na rotoru těchto strojů je umístěno budící vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem z vlastního dynama nebo stejnosměrné sítě. Výkon budícího vinutí je řádově několik procent oproti výkonu synchronního stroje. Rotor synchronních generátorů je připojen k vnějšímu pohonu, jenž je realizován ve většině případů turbínami, ale mohou jimi být také spalovací motory. Pokud se rotor otáčí a budícím vinutím prochází proud, vzniká točivé magnetické pole. Toto pole pak indukuje ve vinutí statoru střídavé trojfázové napětí. Po připojení statorového vinutí ke spotřebiči začne, vinutím procházet střídavý proud, který vyvolá druhé magnetické pole ve statoru. Jak už bylo uvedeno, obě tyto pole se otáčí stejnou rychlostí odtud tedy synchronní. Rychlost magnetického pole statoru je dána vztahem:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{2 \cdot p} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (2.1)$$

kde f - frekvence napájecího proudu
 p - počet pár pólů

Protože synchronní stroj pracuje pouze se synchronními otáčkami, tak při zatížení se stroj pořád snaží kopírovat otáčení magnetického pole statoru a otáčky se nemění se zatížením, ale mění se zátěžný úhel β , který vyjadřuje vzájemné posunutí magnetických polí. Velikostí tohoto zátěžného úhlu β určujeme pracovní režimy stroje. Jestliže $\beta=0$ tak je ztížení nulové, magnetické pole statoru a rotoru nejsou vůči sobě posunuty. Pokud $\beta>0$ tak je magnetické pole rotoru zaostává za magnetickým polem statoru, v tomto případě se jedná synchronní motor (obr. 2. 2). Pro generátorický chod tedy platí $\beta<0$ je opačný motorickému chodu, platí tedy, že pole rotoru předbíhá magnetické pole statoru. Velikost zátěžného úhlu je důležitá, protože při překročení jeho maximální hodnoty β_{\max} stroj vypadne ze synchronizmu. [1] [8] [12]



Obr. 2. 2 Motorický režim synchronního stroje [8]

Synchronní stroje se hojně používají jako motory pro větší a velké výkony (např. pohon kompresorů). Pracují s dobrým účínkem z pravidla $\cos\phi=,1$ můžou také pracovat v přebuzeném stavu jako kompenzátory.

Nejčastěji však nalézají synchronní stroje uplatnění při přeměně mechanické energie na elektrickou. Synchronním stroje, které dodávají střídavou elektrickou energii, běžně označujeme jako alternátory. Patří k největším vyráběným strojům a mají největší výkony, které přesahují hodnoty 1000 MW. V běžné praxi jsou alternátory poháněny plynovými, větrnými, vodními a parními turbinami. [1] [8] [12]

2.3. Rozdělení generátorů

Synchronní generátory rozdělujeme podle provedení na dvě hlavní skupiny. První skupinou jsou stroje s hladkým rotorem nazývané též turboalternátory, do druhé skupiny spadají ostatní synchronní stroje s vyniklými póly, tyto stroje označujeme jako hydroalternátory. Je však možno dělit generátory dle jiných kritérií:

dle výstupního proudu

- 1) alternátory -generují střídavý proud
- 2) dynamy -generují stejnosměrný proud

dle konstrukce

- 1) turbogenerátory
- 2) hydrogenerátory
- 3) axiální generátory

dle počtu fází

- 1) jednofázové generátory
- 2) třífázové generátory
- 3) vícefázové generátory

dle otáček

- 1) synchronní generátory
- 2) asynchronní generátory

2.3.1. Turboalternátory

Jsou to obvykle dvou pólové stroje, které mají budící vinutí uložené ve vyfrézovaných drážkách v tělese rotoru. Drážky zabírají většinou 2/3 rotoru zatímco zbylá 1/3 je bez drážek. Při návrhu se vychází ze zkušeností a praxe získaných z dosud vyrobených strojů. Rychlost otáčení stroje při $2p=2$ a při frekvenci 50Hz je 3000 ot. /min. při této rychlosti existuje určitá hranice průměru rotoru. Protože s rostoucím průměrem roste jeho obvodová rychlost a tím i odstředivá síla, která může narůst, až do meze pevnosti materiálu rotoru a tedy rotor poškodit, proto se rotory konstruují do průměru 1,2m. Pokud je tedy za potřeby zvětšit výkon stroje, je nutno zvětšit jeho délku. [1][16] Obr. 2.3 Rotor synchronního turboalternátoru [14]



Obr. 2.4 Rotor synchronního turboalternátoru [14]

Frekvence generovaného napětí je dána vztahem:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} [Hz] \quad (2.1)$$

Kdef je frekvence
p je počet pár pólů
n jsou otáčky

Napětí generované pro jednu fázi je dáno vztahem:

$$U_i = 4.44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \Phi [V] \quad (2.3)$$

kde N_1 – počet závitů jedné fáze

k_{v1} – činitel vinutí statoru

f_1 – kmitočet

Φ – magnetický tok v rozmezí jedné pólové rozteče

2.3.2. Hydroalternátory

Tyto stroje mají na rotoru vyniklé póly s pólovými nástavci. Počet těchto pólů se pohybuje $2p \geq 4$. Z konstrukce plyne proměnná vzduchová mezera. Ta má za následek další složku momentu, která se nazývá reluktanční a není závislá na budícím proudu, ale závisí na geometrii rotoru. Na pólech těchto strojů je navinuto budící vinutí a na konci pólu jsou připevněné pólové nástavce. Póly jsou vyrobeny z ocelolitiny nebo z dynamo plechů, ze kterých jsou zhotoveny pólové nástavce. Vzhledem k většímu počtu pólů je pro dosažení frekvence 50Hz třeba nižších otáček než u turboalternátorů. Tyto generátory se používají ve vodních elektrárnách. Jejich výkon závisí na výšce vodního spádu a velikosti průtoku vody. [1] [2] [16]



Obr. 2.5 Rotor hydroalternátoru umístěného na přehradě Lipno

3. Magnetické materiály

3.1 Úvod do magnetizmu

Projevy magnetizmu jsou již dlouho známy, protože se magnetické pole projevuje silovými jevy, proto jeho působení pozorovali lidé již v dobách před n. l. Uvádí se, že označením názvu magnetického pole vniklo zobecněním názvu města Magnésie ve starém Řecku, kde se povrchově těžila zmagnetovaná železná ruda (magnetovec (Fe_3O_4)) v době 500 let př. n. l. Teorii, která by vysvětlovala samotnou podstatu magnetického pole, bylo možné vytvořit až z prvních poznatků, při průchodu proudu vodičem a dále s teorií o struktuře hmoty v počátcích 20. století. Magnetismus je přirozený jev, způsobený pohybem elektrických nábojů ve vodiči (elektrický proud) nebo pohybem elektronů v obalech atomů (rotace kolem jádra atomu). Tato rotace elektronu vytváří základní magnetické momenty. Jestliže jsou v látce magnetické momenty jednotlivých atomů neuspořádané, tak se navzájem jejich účinky ruší, ale pokud je jejich orientace stejná, tak momenty sčítají a s počtem stejně orientovaných momentů roste i magnetizace. Což navenek vnímáme jako silnější magnetické pole. [15] [4]

3.1.1. Veličiny popisující magnetické pole

Magnetický tok (Φ)

Jedná se o vektorovou fyzikální veličinu, jež udává počet (indukčních) siločar magnetického pole, které projdou danou plochou. Tato plocha je kolmá na směr siločar. Je velikost vyjádřena pomocí základního matematického vztahu:

$$\Phi = B \cdot S \text{ [Wb]} \quad (3.1)$$

kde B – magnetická indukce
 S - plocha

Intenzita magnetického pole (H)

Jedná se o vektorovou fyzikální veličinu, jež popisuje míru silových účinků magnetického pole, nezávisle na parametrech prostředí, v němž se magnetické pole vytváří.

Základní vztahy:

$$H = \frac{F_m}{l} \text{ [Am}^{-1}\text{]} \quad (3.2)$$

kde F_m je magnetometrické napětí
 l je střední délka siločáry magnetického pole

$$H = \frac{B}{\mu} \text{ [Am}^{-1}\text{]} \quad (3.3)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \text{ [Am}^{-1}\text{]} \quad (3.4)$$

Magnetická indukce (B)

Jedná se o vektorovou fyzikální veličinu, která udává kolik (indukčních) siločar magnetického pole projde plochou 1m^2 , tato plocha je kolmá na orientaci směru siločar.

Základní vztah pro výpočet je:

$$B = \mu \cdot H \text{ [T]} \quad (3.5)$$

Permeabilita (μ)

Udává prostupnost prostředí pro magnetické pole, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Jedná se o skalární fyzikální veličinu, ta je vyjádřena z(3.5):

$$\mu = \frac{B}{H} \text{ [Hm}^{-1}\text{]} \quad (3.6)$$

Další důležitou hodnotou je permeabilita vakua jeho prostupnost pro magnetické pole má hodnotu:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1.256637 \cdot 10^{-6} \text{ [T/Am}^{-1}\text{]} \quad (3.7)$$

Poslední hodnotou je relativní (poměrná) permeabilita prostředí, taktéž se jedná o skalární fyzikální veličinu. Udává prostupnost prostředí, ve kterém je pole vytvářeno. Jinými slovy vyjadřuje, kolikrát je dané prostředí pro magnetické pole prostupnější než vakuum. Je dána vztahem:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} [-] \quad (3.8)$$

3.1.2. Látky rozdělené podle poměrné permeability

Podle poměrné permeability se dělí látky na:

- | | |
|-------------------|---------------|
| 1) diamagnetické | $\mu_r < 1$ |
| 2) neutrální | $\mu_r = 1$ |
| 3) paramagnetické | $\mu_r > 1$ |
| 4) feromagnetické | $\mu_r \gg 1$ |

Diamagnetické látky

Jsou to materiály, které mírně zeslabují vnější magnetické pole, lehce odpuzují magnetické siločary od sebe. Mezi tyto látky můžeme zařadit inertní plyny, zinek, rtuť, některé plasty, měď ($\mu_r=0,99999$) a vodu ($\mu_r=0,999991$). Dnes lze považovat za dokonalé dielektrikum supravodivé materiály typu I zchlazené pod svou kritickou teplotu. [15]

Neutrální látky

Dá se říci, že se jedná o látky, které nemají vliv na magnetické pole, nezeslabují ani nezesilují, touto látkou je např. vakuum. [15]

Paramagnetické látky

Tyto látky, nemají vykompenzovány všechny magnetické momenty. Atomy těchto látek mají ve své valenční sféře elektronového obalu většinou méně jak 4 elektrony. Atomy mají své vlastní

magnetické momenty uspořádány jinými směry. Tyto látky vnější magnetické pole mírně zesilují. Naproti diamagnetickým látkám, které magnetické siločáry mírně vtahují. Mezi tyto látky lze zařadit plyný kyslík ($\mu_r=1,00000186$), hliník ($\mu_r=1,000023$), platinu, chrom, titan a kovy vzácných zemin. [15]

Feromagnetické látky

Mají ($\mu_r \gg 1$) řádově 100 až 100 000. Atomy mají stálý magnetický moment a v látce jsou pak vytvořeny oblasti se stejnou orientací tohoto momentu, těmto oblastem říkáme magnetické domény. Tyto domény jsou bez působení vnějšího magnetického pole orientovány náhodně a navzájem se kompenzují. Když na tyto látky začne působit vnější magnetické pole, začnou se jednotlivé domény natáčet ve směru působícího pole, to se projeví velkým zesílením pole a zpravidla také zmagnetováním této látky. Zesilování pole probíhá až do takzvaného stavu nasycení, to je stav, kdy jsou všechny domény natočeny ve směru pole. K těmto materiálům se řadí železo, nikl, kobalt, gadolinium a jejich slitiny. [15]

3.1.3. Hodnocení vlastností magnetických materiálů

Abychom mohli porovnávat magnetické vlastnosti materiálů (feromagnetických) používáme především grafických metod:

1) magnetizační křivky

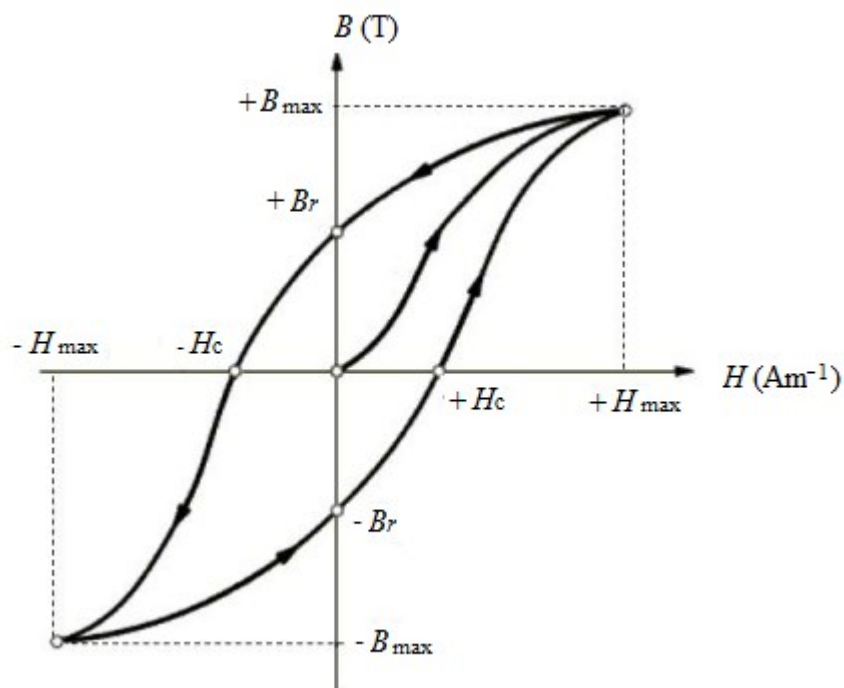
Ty ukazují, jak se mění hodnoty magnetické indukce (B) v závislosti na změně magnetického pole (H) u materiálu, jenž nebyl vystaven magnetizaci. Nazývá se těž křivka prvotní magnetizace.

2) hysteresní křivky

Tato křivka vyjadřuje závislost magnetické indukce (B) na intenzitě magnetického pole (H) při plynulé změně působení magnetického pole od hodnot ($+H_{\max}$) až po ($-H_{\max}$), kde maximální hodnoty odpovídají nasycení materiálu. Dle velikosti plochy smyčky dělíme materiály na magneticky měkké (malá plocha smyčky) a magneticky tvrdé (velká plocha smyčky). Plocha smyčky vyjadřuje, kolik energie je třeba dodat, aby mohl být materiál přemagnetován. Materiály magneticky měkké se snadno magnetují a používají se pro střídavé obvody, magnetické tvrdé se hůře magnetují a mají velkou remanentní (zbytkovou) indukci. Při přemagnetování se v magnetických obvodech projevují ztráty v podobě tepla, nazýváme je ztráty hystereze a jsou závislé na ploše smyčky. [4] [15]

Remanence B_r – udává indukci, kterou má materiál při nulové intenzitě magnetického pole.

Koercitivita H_c - udává hodnotu intenzity magnetického pole, při které materiál nemá indukci.



Obr. 3. 1 Hysterezní smyčka

3.2. Materiály permanentních magnetů

Materiály permanentních magnetů je možné rozdělit z pohledu historického vývoje na:

- 1) AlNiCo
- 2) Ferity
- 3) SmCo
- 4) NdFeB

3.2.1. AlNiCo

Název magnetu získali díky svému složení, ze kterého jsou tvořeny 7-10% Al, 13-16% Ni, 20-40% Co, zbytkem bývá Fe. Dalšími příměsami mohou být Cu 3-5%, Ti (1-8%) či Nb a Ta. Tyto magnety byly vynalezeny již v roce 1931. Magnety se vyrábí odléváním nebo práškovou metalurgií neboli spékáním. Je možné je vyrábět jak izotropní nebo anizotropní, dnes jsou častěji vyráběné jako izotropní. Magnety mají nejvyšší stabilitu magnetických parametrů v závislosti na teplotě ze všech dnes vyráběných magnetů a taky disponují nejvyšší Curieho teplotou T_r a mají tak nejvyšší možnou pracovní teplotu T_{max} . Další jejich výhodou je odolnost proti korozi. Maximální energetický součin je i něco vyšší než součin feritových anizotropních magnetů. Nízké hodnoty koercivity H_c znamenají, že magnety jsou náchylné na silné demagnetizační pole, to je v celkovém důsledku omezuje v rozsahu použitých aplikací. Na magnety AlNiCo mají vliv i mechanické nárazy, které mají vliv na jeho demagnetizaci.

Hlavní výhoda magnetu AlNiCo spočívá ve vysoké teplotní stabilitě a vysoké maximální pracovní teplotě a odolnosti proti korozi. Nejčastější použití je v oblastech pro motory střední velikosti, generátory, reproduktory, akustické měniče, měřicí přístroje, přídržné průmyslové systémy.[4][13][15][17]

Tabulka 3. 1 Magnetické vlastnosti AlNiCo pro vybrané typy [17]

Typ	Koercivita	Remanence	Max. součin	Curieova teplota
	H_{cB} [kA/m]	B_r [mT]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	°C
LNGT 32	100	800	32.0	860
LNGT 40	110	800	40.0	860
LNGT 60	110	900	60.0	860
LNGT 72	112	1050	72.0	860

3.2.2. Ferity

Jsou vyráběny z feritu barya ($BaFe_{12}O_{19}$) či feritu stroncia ($SrFe_{12}O_{19}$). Jsou vyráběny jako izotropní nebo anizotropní. Anizotropní znamená, že mají jiné vlastnosti v jednom směru než v ostatních, toho se dosahuje lisováním za působení magnetického pole. Zrna jsou pak orientována podél přednostních os magnetizace. Anizotropní magnety mají podstatně lepší parametry přibližně čtyřikrát větší hodnotu maximálního energetického součinu a dvojnásobnou remanenci B_r . Hodnoty maximálního energetického součinu jsou podobné jako hodnotám u AlNiCo. Ferity mají větší hodnoty koercivity H_c díky čemuž je možné jejich nasazení i v přítomnosti silných demagnetizačních polí. Mají druhou nejvyšší pracovní teplotu hned po AlNiCo (400°C) ale jsou více teplotně závislé (10krát až 15krát více než AlNiCo).

Výhodou je i jejich malá elektrická vodivost proto i menší ztráty vířivými proudy v magnetu. Feritové magnety bývají kompromisním řešením v řadě aplikací díky provozní teplotě, odolnosti proti korozi a také poměrně nízké pořizovací ceně. Jako nevýhodu lze uvést, že jejich výroba a recyklace má negativní dopad na životní prostředí. Používají se u motorů přibližně do 7,5 kW pro reproduktory, mikrofony, magnetické zámky na nábytku, automobilový průmysl (větráčky, stěrače, pumpy) a mechanické hračky. [4][13][15][17]

Tabulka 3. 2 Magnetické vlastnosti – Ferity pro vybrané typy [17]

Typ	Koercivita	Remanence	Max. součin	Curieova teplota
	H_{cB} [kA/m]	B_r [mT]	$(BH)_{max}$ [kJ/m ³]	°C
Y25	135-170	360-390	22.5-28.0	450
Y30	175-210	380-400	26.0-30.0	450
Y30BH	230-275	380-400	27.0-32.5	450
Y35	160-190	400-420	30.0-33.5	450

3.2.3. SmCo

První ze skupiny moderních magnetů na bázi prvků vzácných zemin byl vyvinut právě SmCo, přibližně roku 1960. Disponuje nízkou teplotní závislostí a maximální provozní teplotou mezi 300°C a 350°C, ale při teplotě nad 250°C se prudce zvedá náchylnost k oxidaci, to v praxi vede k tomu, že pracovní teplota je níže než Curieho teplota a omezení v množství nasazení do různých aplikací. Naopak za běžných pracovních teplot mají magnety poměrně vysokou odolnost proti korozi. Stejně jako Ferity mohou pracovat v přítomnosti silných demagnetizačních polí.

Samarium-kobaltové magnety nalézají využití ve výkonových motorech, motorech s malým objemem a velkým poměrem výkon/váha, magnetických brzdách a spojkách, snímačích a tam, kde jsou vyžadována stabilní magnetická pole při proměnlivé teplotě. Nevýhodou je cena, protože oba prvky mají jen omezené světové naleziště. [4][13][15][17]

Tabulka 3. 3 Magnetické vlastnosti - SmCo pro vybrané typy [17]

Typ	Koercivita	Remanence	Max. součin	max.teplota použití
	H _{cB} [kA/m]	B _r [mT]	(BH) _{max} [kJ/m ³]	°C
YX-24	730-770	960-1000	175-190	250
YXG-24	637-732	950-1020	175-190	300
YXG-26	748-796	1020-1050	195-215	300
YXG-28	756-796	1050-1080	205-220	300

3.2.4. NdFeB

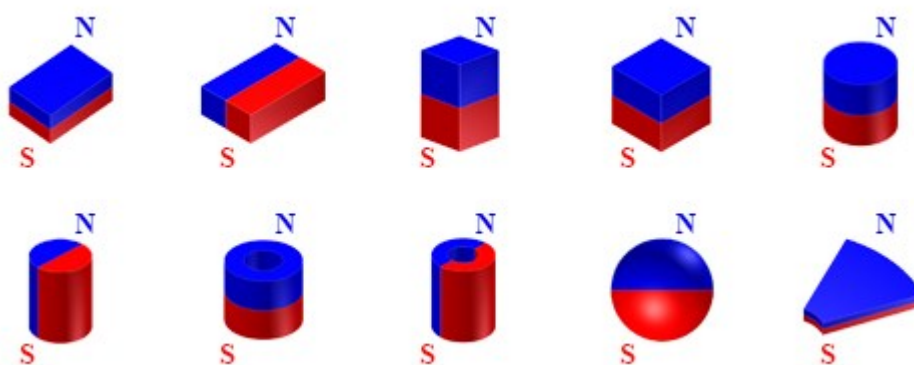
Jak posledním ze skupiny magnetů na bázi slitin ze vzácných zemin je složen z prvků neodym-Nd, železo-Fe, bór-B. Má největší úspěch na trhu. Vyrábí se pomocí práškové metalurgie, jsou lisovány v magnetickém poli, tím získávají anizotropní strukturu. Při pokojových teplotách dosahují velkých hodnot magnetického součinu $(BH)_{\max}$ přibližně 400 kJ/m³. NdFeB mají také vysoké hodnoty remanentní magnetické indukce B_r . Přibližně 1,2 T, nejkvalitnější magnety dosahují hodnoty 1,4 T. a zároveň disponují vysokou remanencí až 860 kA/m. Srovnáním s SmCo zjistíme že NdFeB mají nižší rozsah pracovních teplot a jsou více závislé na teplotě, na což je třeba myslet už při návrhu aplikace. Protože neodym je náchylný na oxidaci, jsou tyto magnety opatřeny antikorozními vrstvami tvořenými niklem, zinkem někdy také zlatem či stříbrem.

Mezi výhody patří vysoká remanence a koercivita, to se uplatňuje při miniaturizaci. Na trhu je dnes mnoho typů magnetů maximální teplotu až do 210°C značných: M – H – SH – UH – EH podle teplotní třídy z větší odolností také stoupá cena. Nalézá řadu uplatnění, kde je třeba vyvinout velkou sílu nebo dosáhnout co nejmenších rozměrů. Například magnetické spojky, brzdy, dále pro rotory a statory motorů, magnetické separátory, kuchyňské stroje a podobně. [4][13][15][17]

Tabulka 3. 4 Magnetické vlastnosti - NdFeB pro vybrané typy [17]

Typ	Koercivita		Remanence	Max. součin	max.teplota použití
	Hc _B	Hc _j	B _r [mT]	(BH) _{max} [kJ/m3]	°C
	[kA/m]				
N35	≥868	≥955	1170-1210	263-287	90
N45	≥835	≥955	1330-1370	342-366	80
N50	≥842	≥876	1400-1440	324-342	70
N52	≥842	≥876	1440-1470	394-414	70

Magnety je možné magnetovat mnoha způsoby a není výjimkou, že firmy nabízejí magnetování na objednávku.



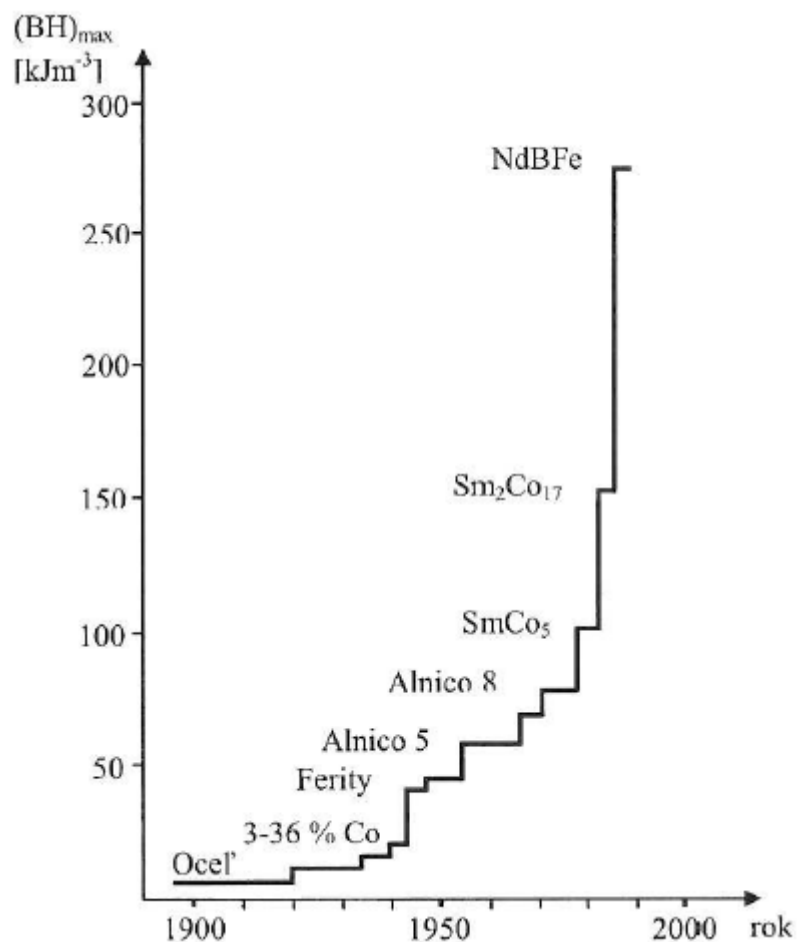
Obr. 3. 2 Nabízené tvary magnetů [18]

3.2.5. Vliv teploty

V permanentních magnetech jsou malé mikroskopické oblasti (o objemu 0,001 až 10 mm³), říkáme jim magnetické domény. Pokud se teplota materiálu zvyšuje, tak každý atom začíná oscilovat okolo své střední polohy v krystalové mřížce a tato oscilace má za následek pokles magnetizace. Dalším zvyšování teploty materiál dosáhne **Curieho teploty** při této teplotě se skokově sníží všechna magnetizace v materiálu na nulu. Pokud je Curieho teplota níže než teplota, při které nastávají metalurgické změny v materiálu, tak je materiál možné znovu zmagnetizovat.[4] [15]

3.2.6. Maximální energetický součin $(BH)_{\max}$

Tato hodnota ukazuje maximální vnější energii vytvořenou jednotkovým objemem daného materiálu. Na základě této hodnoty se porovnávají a hodnotí užité vlastnosti permanentních magnetů. Cílem u permanentních magnetů je, aby tato hodnota byla co největší.[4]



Obr. 3. 3 Vývoj materiálů permanentních magnetů v závislosti na $(BH)_{\max}$ [4]

3.3. Magneticky měkké materiály

Magneticky měkké materiály hrají důležitou roli v konstrukci elektrických strojů, používají se pro vedení magnetického toku. Hlavní rozdíl proti magneticky tvrdým materiálům (například permanentní magnety), je velikost hysterezní smyčky, která má být u těchto materiálů co nejmenší a dosáhlo se co nejmenších ztrát.

3.3.1. Magneticky měkká ocel

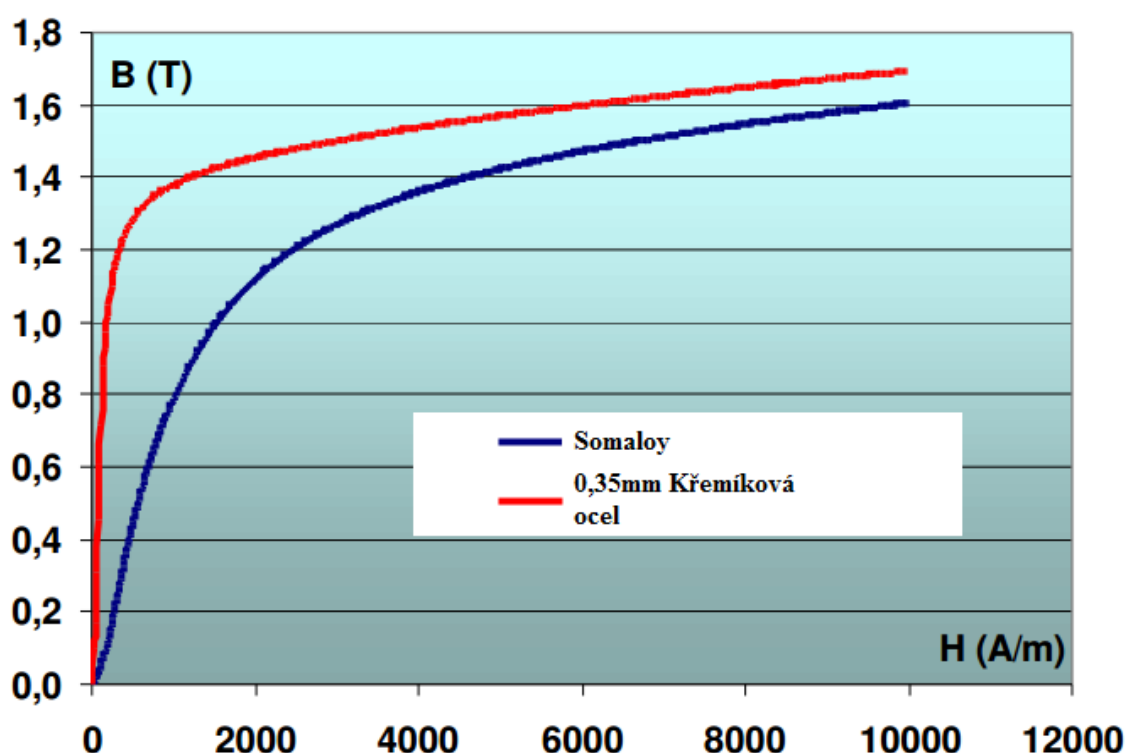
V elektrotechnice se tyto materiály používají nejčastěji ve formě plechů (elektrotechnické plechy). Plechy obsahují příměs křemíku v rozmezí 0,5% až 4%, to snižuje ztráty vířivými proudy, při větším obsahu by byl materiál hůře zpracovatelný a křehký. Elektrotechnické plechy dělíme do dvou základních skupin, na plechy orientované a neorientované.

Orientované plechy se vyrábí válcováním za studena, tím se zlepšují magnetické vlastnosti ve směru válcování, což je způsobeno orientací krystalů v materiálu. Orientované plechy se používají převážně u přístrojů pro zhotovení magnetických obvodů elektromagnetů stykačů, brzd a pro výrobu přístrojových transformátorů.

Neorientované plechy jsou vyráběny válcováním za studena a mají stejné magnetické vlastnosti ve všech směrech, používají se pro výrobu magnetických obvodů točivých strojů. Plechy jsou vyráběny od tloušťky 0,12 do 0,64 mm. Pro snížení ztrát vířivými proudy, jsou plechy z jedné strany izolovány. Měrné ztráty jsou udávány ve wattech na kilogram při kmitočtu 50Hz a při indukci 1T a 1,5T. Pokud je požadavek na aplikace při vysoké frekvenci, tak jsou nahrazovány amorfními materiály. [3]

3.3.2. Magneticky měkké práškové materiály

Výrobky z těchto materiálů nalézají uplatnění při výrobě složitých magnetických obvodů nebo pro jádra malých strojů. Materiály jsou zpracovávány technologií práškové metalurgie, při které jsou zhotoveny polotovary či celé výrobky spojováním různých kovových či nekovových materiálů za působení teploty a tlaku. Postup výroby zahrnuje vlastní výrobu prášků, např. mletím nebo drcením, jejich úpravu jako sušení, míchání, pak následuje lisování a spékání neboli slinování výlisku. Vlastnosti výsledného materiálu jsou odvíjeny od jednotlivých přísad směsi. Směs využívaná v elektrotechnice je tvořena většinou železným práškem, skelnými nebo uhlíkovými vlákny pro zlepšení mechanických vlastností a pojivem - většinou epoxidovou pryskyřicí. Příkladem takového materiálu používaného v elektrotechnice je materiál nazývaný Somaloy.



Obr. 3. 4 BH křivka pro Křemikovou ocel a Somaloy

4. Synchronní stroje s permanentními magnety

Tyto generátory jsou principiálně stejné jako výše uvedené synchronní stroje. Hlavní rozdíl mezi synchronními stroji, klasickými a s permanentními magnety je v buzení. Stroje s permanentními magnety jsou buzeny PM magnety a nepotřebují buzení stejnosměrným proudem, jsou řešeny jako bezkartáčové. Není tedy třeba vnějšího zdroje a ztráty v rotoru jsou menší, protože v magnetech nevznikají ztráty, jako v budícím vinutí, to zvyšuje celkovou účinnost stroje. Na druhou stranu vznikají v magnetech ztráty vířivými proudy. Nevýhodou je ztráta možnosti regulace buzení, vyšší cena a technologická náročnost, ale také možnost vzniku stavu, kdy dojde k odmagnetování, díky vyšší teplotě nebo velkému proudovému rázu ve statoru stroje. [3] [21]

Výhody:

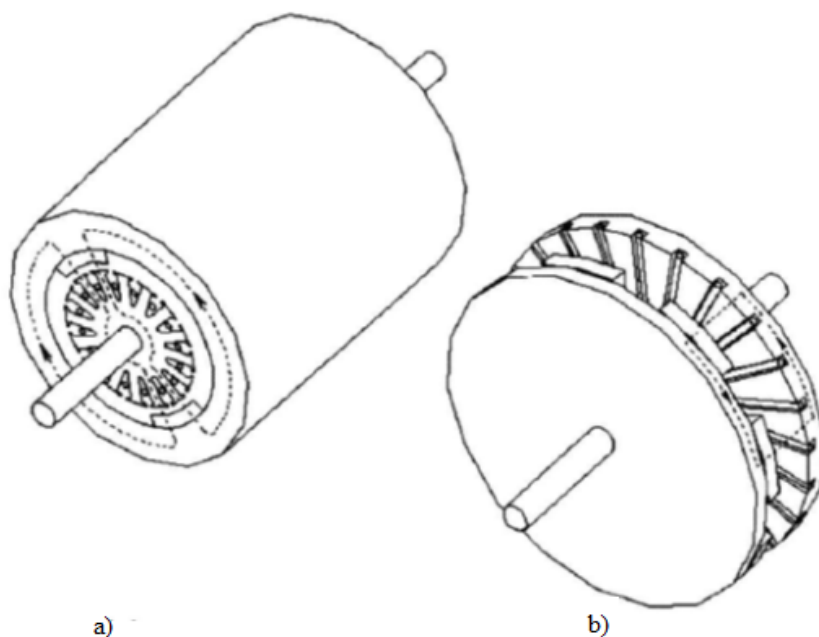
- 1) absence budícího vynutí a zdroje stejnosměrného proudu
- 2) vyšší účinnost motoru
- 3) menší rozměry a celková nižší hmotnost stroje
- 4) vyšší momentová přetížitelnost
- 5) nižší moment setrvačnosti a rychlejší odezva na řídicí impulzy
- 6) nižší ztráty stroje
- 7) vyšší flexibilita uplatnění v průmyslu

Nevýhody:

- 1) vyšší pořizovací cena
- 2) vyšší technologická náročnost při návrhu i výrobě stroje
- 3) odmagnetování motoru při silném proudovém rázu ve statoru stroje
- 4) stroj je trvale buzený a nelze ho odbudit, pokud se točí, má vždy nějaké svorkové napětí (problém v některých aplikacích)

Synchronní stroje s PM lze rozdělit podle směru magnetického toku na několik základních typů:

- 1) stroje s radiálním tokem
- 2) stroje s axiálním tokem



Obr. 4. 1 Ukázka a) radiální stroj s permanentními magnety b) axiální stroj s permanentními magnety [3]

4.1. Radiální stroj s permanentními magnety

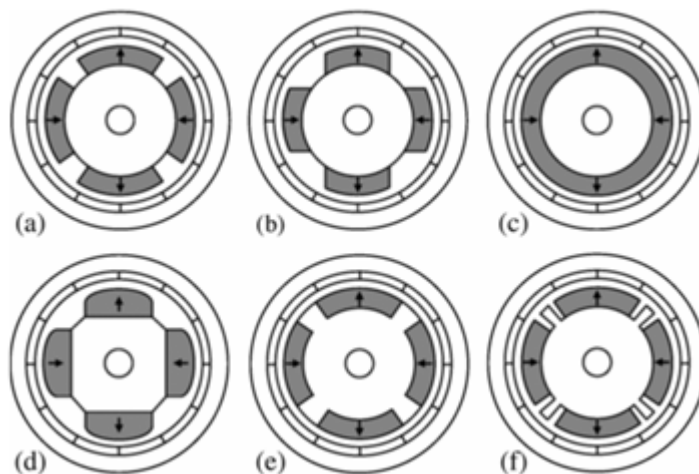
Tyto stroje jsou nejvíce používané. Protože oproti jiným typům je výroba celého motoru jednodušší. Konstrukce je podobná výše popsaným synchronním strojům. Stator těchto strojů je vyroben z izolovaných plechů, jež jsou opatřeny drážkami, v nichž je umístěné vinutí. Rotor je zhotoven z plechů nebo plného materiálu a je opatřen permanentními magnety. Konstruuje se pro malé a střední výkony, v technických možnostech je i konstrukce velkých výkonů, zde naráží na problém s velkou pořizovací cenou. Uplatnění nalézají v kolejové dopravě, kde se uplatňuje schopnost dodávat vysoký moment. Rozmach zažívají v automobilovém průmyslu, díky důrazu na ochranu životního prostředí, se rozšiřují hybridní automobily poháněny právě těmito stroji. V neposlední řadě se uplatňují při výrobě energie z obnovitelných zdrojů.

Radiální stroje můžeme rozlišit dle umístění rotoru a uspořádání magnetů na:

- 1) stroje z vnitřním rotorem
- 2) stroje z vnějším rotorem
- 3) vnější uspořádání (obvodové)
- 4) vnitřní uspořádání (skryté)

Povrchové uspořádání - Toto uspořádání lze srovnat se synchronním strojem s hladkým rotorem,

Vnitřní uspořádání - U tohoto typu uspořádání jsou magnety uloženy uvnitř rotoru, tento typ uspořádání se srovnává se stroji s vyniklými póly.



Obr. 4. 2 Ukázka možných uložení magnetů

4.2. Axiální stroj s permanentními magnety

4.2.1. Úvod do axiálních strojů

Z historie elektrických strojů vyplývá, že první elektrické stroje byly realizovány ve formě strojů s axiálním tokem. První takový stroj vynalezl Michael Faraday v roce 1821, byl to prakticky jednoduchý stejnosměrný stroj s permanentními magnety. Ale o několik let později byly vyhlazeny stroje s radiálním tokem a poté patentovány v roce 1837 T. Davenortem. Tento typ stroje se uchytil a hojně se rozšířil. Důvodem, proč stroje radiální převládaly, byly těžkosti doprovázející konstrukci axiálních strojů jako řezání drážek do plechů statorů, velká přitažlivá síla mezi statorem a rotorem, potíže s udržením konstantní vzduchové mezery, celkové potíže při montáži. To vše mělo za následek vysoké náklady, které byly spojeny s výrobou axiálních strojů. Objevily se i pokusy s použitím buzení pomocí permanentních magnetů, ale vzhledem k jejich špatné kvalitě se od jejich použití upustilo. Až s nástupem kvalitnějších materiálů permanentních magnetů jako AlNiCo, Ferity a zejména z prvků vzácných zemin (NdFeB) se stroje buzené magnety staly bodem zájmu a výzkumu. I když byly stroje s radiálním tokem v popředí, pokračovalo zkoumání axiálních strojů nadále hlavně díky možnostem uplatnění ve speciálních aplikacích z hlediska geometrie. Elektromagnetická konstrukce je obdobná jako u strojů radiálních, ale liší se náročností mechanického návrhu, montáže či tepelnou analýzou. Výrobní postupy jednotlivých částí strojů obou typů jsou obdobné, ale výroba axiálních strojů vyžaduje jiný typ výrobního zařízení, to má za následek velké investice a při malém objemu výroby velkou cenu na jeden kus. Axiální stroj s permanentními magnety, též nazývaný jako diskový stroj, se stává atraktivní variantou k radiálnímu stroji. [3] [21]

Pro svou kompaktnost, vysokou hustotu výkonu a možnosti různých typů konstrukce a možnosti integrovat rotor do poháněného tělesa, nalézají využití pro pohon elektrických vozidel, čerpadel, odstředivek, obráběcích strojů i v dalších průmyslových aplikacích. Je možné je konstruovat o velkých průměrech a tím dosáhnout vysokého momentu setrvačnosti. Ty se pak uplatní jako setrvačníky či pohony výtahů. Díky možnosti umístění velkého množství pólů můžou pracovat jako vysoko-frekvenční nebo pomalu běžné stroje bez nutnosti převodovky. [3] [21]

Schopnost práce při nízkých otáčkách bez nutnosti převodovky a díky tlaku na ochranu životního prostředí a využití obnovitelných zdrojů energie, jsou axiální stroje ideální pro transformaci energie z obnovitelných zdrojů pro malé výkony. Stroje malých výkonů se většinou konstruují, jako bezdrážkové mají vzduchový stator (cívky statoru jsou zality v nemagnetickém materiálu s permitivitou přibližně jako u vzduchu) díky tomu je náročnost na konstrukci jednodušší a cena nižší. Zastoupení těchto strojů ve využití obnovitelných zdrojů stále roste, to je způsobeno dostupností kvalitních materiálů permanentním magnetů a pro stroje se statorem bez drážek i lehčí konstrukcí, myslím si, že právě tím se stává atraktivním pro řadu kutilů a malých firem. Lze je použít, jak pro získání energie z větru, tak i z malého vodního toku. Uplatnění nalézají v chatových oblastech a odlehlých místech, v méně rozvinutých zemích světa, kde se pak stávají jediným dostupným zdrojem elektrické energie.

Výhody těchto strojů oproti radiálním by se daly shrnout jako:

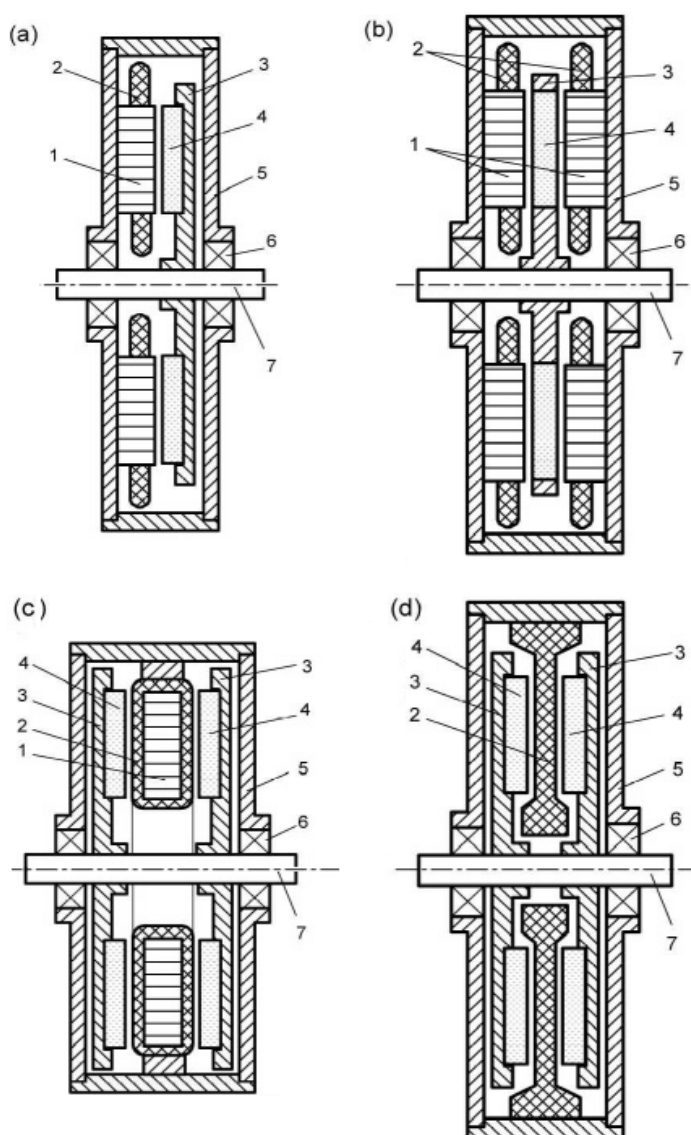
- 1) mnohem větší poměr průměru k délce než radiální
- 2) při správném návrhu dosahují větší hustoty výkonu a úspory materiálu
- 3) mají větší počet pólů, jsou tedy vhodné pro pomaluběžné aplikace
- 4) rovinná vzduchová mezera s možností nastavení

Nevýhody:

- 1) náročnější návrh
- 2) složitější konstrukce
- 3) vyšší pořizovací cena

Dá se nalézt několik konfigurací axiálních strojů vzhledem k jejich uspořádání statoru a rotoru. Nejvhodnější možné konfigurace jsou:

- 1) struktura s jedním statorem a rotorem
- 2) jeden stator umístěn mezi dvěma rotory
- 3) jeden rotor umístěn mezi dvěma statory
- 4) kombinace více stupňů s několika rotory a statory



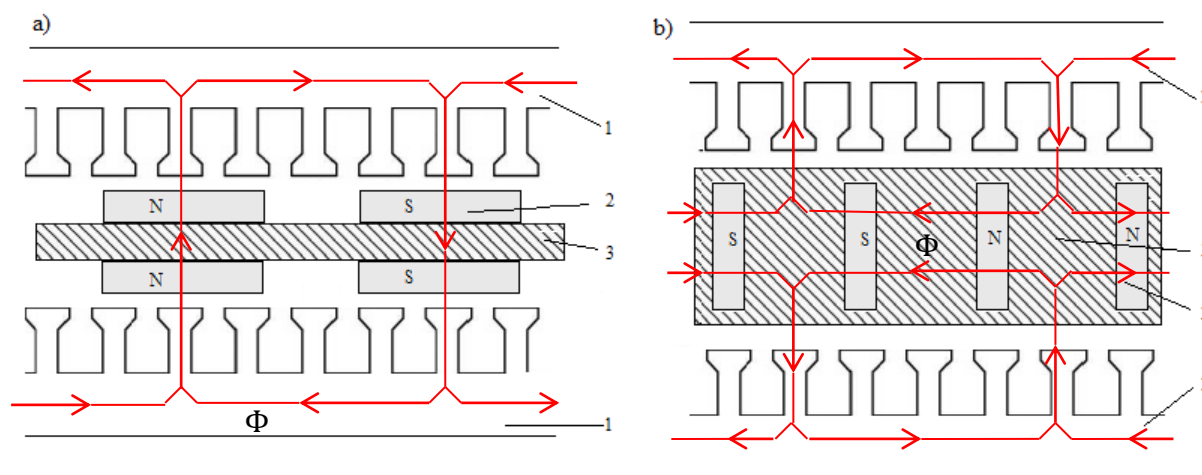
Obr. 4. 3 Základní konstrukce axiálního stroje: a) jednostranný, b) oboustranný s retrem uprostřed, c) Oboustranný s dvojitým vnějším rotorem a magnetickým statorem, d) oboustranný s dvojitým vnějším rotorem a vzduchovým statorem uprostřed. 1 – jádro statoru, 2 – statorové vinutí, 3 – rotor, 4 – permanentní magnety, 5 – rám, 6 – ložisko, 7 – hřídel. [3]

4.2.2. Jednostranné stroje

Konstrukce jednostranného axiálního stroje je jednodušší než konstrukce oboustranná, ale disponuje menším točivým momentem. Nicméně tato konstrukce trpí nevyváženou axiální silou mezi statorem a rotorem, v důsledku čehož je zapotřebí složitější uspořádání ložisek a silnější disk rotoru v porovnání s konstrukcemi, kde jsou axiální síly v rovnováze. V průmyslu nalézá využití jako trakční a servopohon nebo pro bezpřevodové výtahy. [3] [21]

4.2.3. Oboustranné stroje s rotorem uprostřed

Provedení stroje s rotorem uprostřed mezi dvěma statory. Magnety jsou umístěny na povrchu nemagnetického tělesa rotoru pomocí lepidla nebo alternativně mohou být vloženy do tělesa rotoru (obr. 4. 4). Vzduchová mezera takového stroje je poměrně velká a její velikost je dána dvěma mechanickými mezerami a tloušťce umístěných magnetů. Tento stroj může fungovat i při poškození jednoho vynutí. Poměr reaktancí v ose q a d je $X_d=X_q$, což jej umožňuje analyzovat jako válcový stroj z hladkým rotorem. Další výhodou je, že při sériovém zapojení vytváří stejně velké opačné působící síly. [3] [21]

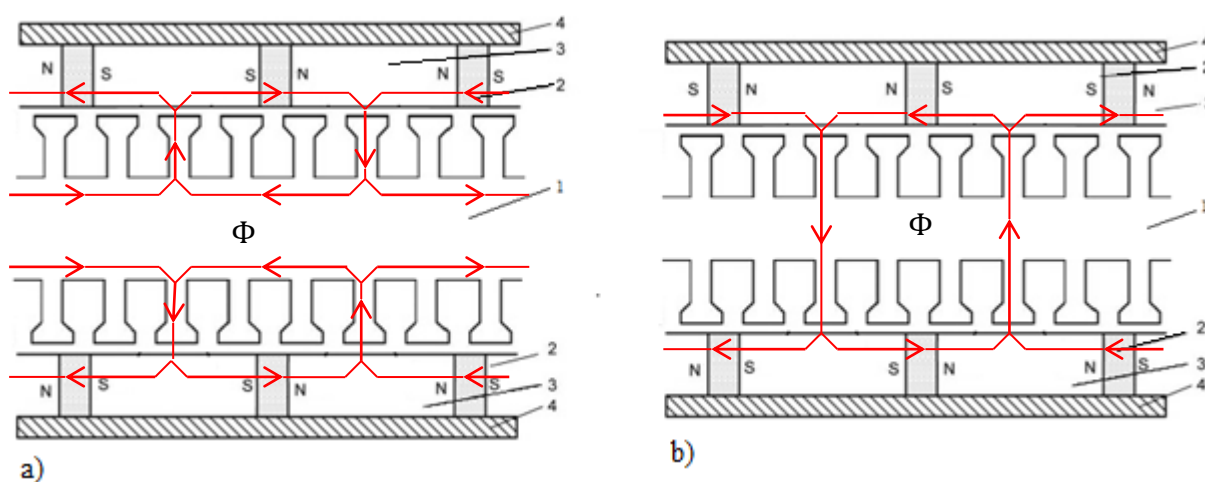


Obr. 4. 4 Magnetický tok strojem s oboustranným rotorem zobrazený ve 2D rovině: a) uspořádání s magnety na povrchu rotoru , b) uspořádání s magnety uvnitř rotoru . 1 – statorové jádro z drážkami, 2 – magnety, 3 – nemagnetický disk rotoru [3]

Konstrukce na obrázku 4. 4. (a) má velmi tenký rotor, zejména pak pokud jsou magnety umístěny místo na povrch do nemagnetického jádra rotoru. Na obr 4.4 (b) je o mnoho širší disk rotoru, což snižuje hustotu energie. Konstrukce obou strojů je v podstatě stejná. Rozptylový tok magnetů je větší než u uspořádání magnetů na povrchu rotoru, protože ty jsou blíže feromagnetickému materiálu statoru. Pokud jsou použity pro uspořádání obr 4. 4 (a) magnety stejné šířky může nastat problém, kdy jsou na vnitřním průměru magnety příliš blízko u sebe, to může vést nadměrnému nasycení jádra na vnitřním průměru. Na vnějším průměru je tak nižší hustota toku, což vede k nerovnoměrnému rozložení hustoty toku ve vzduchové mezeře v zailosti na poloměru stroje. Magnety v uspořádání obr 4.4 (b) mají výhodu v tom, že jsou lépe chráněny před poškozením, opotřebením a korozí. Magnety uvnitř rotoru můžou být uloženy tak, že zmenšují reakci kotvy. [3] [21]

4.2.4. Oboustranné stroje se statorem uprostřed

Stroj se dvěma vnějšími rotory má většinou vícefázové vinutí uložené v drážkách statoru. Stator tohoto stroje může být vytvořen nemagnetickým materiálem, nebo magnetickým zhotoveným z průběžných ocelových pásků či slinutých prášků. Nevýhodou je náročnější upevnění statoru k rámu v porovnání s konstrukcí s rotorem uprostřed. Jeho vzduchová mezera je rovna šířce vzduchové mezery, šířka magnetů a statorového vinutí s izolací. Stator z nemagnetického materiálu nemá ztráty v železe statoru a také nemá žádný reluktanční moment, což při použití u větrných elektráren dává možnost rozběhu při nižší rychlosti větru. Uspořádání magnetů má vliv na magnetický tok ve statoru, možné konfigurace uspořádání a magnetický tok ve stroji je vidět na obr. 4. 5. Stroj je kompaktnější než stroj z rotorem uprostřed a dosahuje větší hustoty výkonu. Tyto stroje se hodí jako generátory se spalovacími motory, generátory malých výkonů pro obnovitelné zdroje, pohony v automobilové technice či pro aplikace ve zvedací technice. [3] [21]



Obr. 4. 5 Magnetický tok strojem v oboustranném rotoru zobrazený ve 2D rovině: a) uspořádání magnetů Sever - Sever, b) upořádání Sever – Jih. 1 – statorové jádro s drážkami, 2 – magnety, 3 – jádra z měkké oceli, 4 - nemagnetický disk rotoru [3]

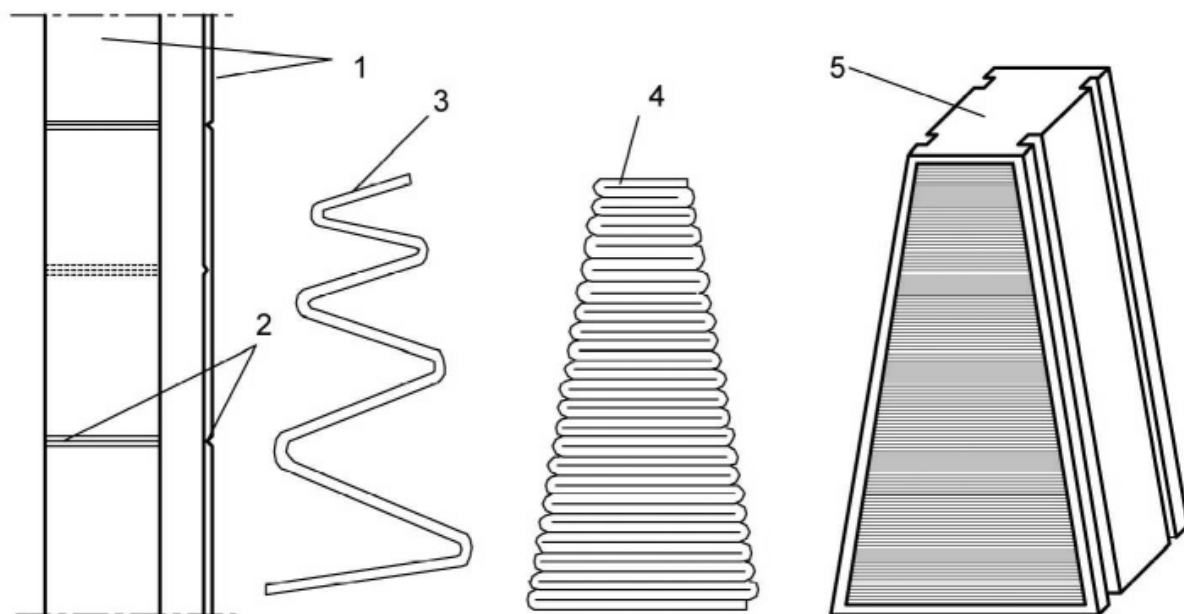
Konstrukce na obrázku 4. 5. (a) jsou si podobné a liší se však šířka jádra statoru. Pro uspořádání magnetů Sever – Sever (NN) jsou fáze vinutí navinuta kolem jádra statoru, což zmenšuje délku čel vinutí. V této konstrukci se díky kratším čelům snižují ztráty v mědi. Zato ale magnetický tok musí téct obvodově podél jádra statoru. To vyžaduje silné jádro statoru a má za následek zvyšování ztrát v železe. Se zvětšujícím státorem se pak také stejně prodlužuje délka čel vynutí. V konstrukci Sever – Jih (NS) obr. 4. 5. (b) proudí magnetický tok axiálně přes stator, tato možnost nabízí konstrukci statoru bez magnetického jádra, na jedné straně to znamená menší ztráty v železe, ale klíny vinutí musí být položeny tak, aby byl stroj schopen produkovat točivý moment, což zvětšuje délku čel vinutí a tím i ztráty v mědi. Na závěr lze říci, že stroj s uspořádáním NN má nižší ztráty v mědi, ale zato vyšší ztráty v železe. [3] [21]

4.3. Konstrukce a výroba

4.3.1. Stator

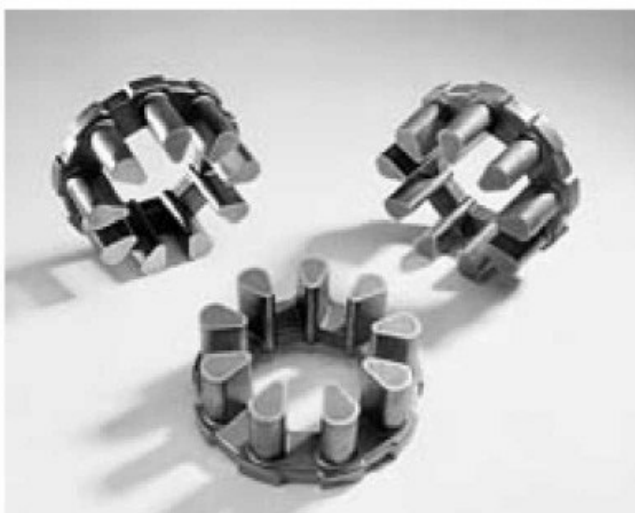
Pokud je statorové jádro axiálního stroje z magnetického materiálu, pak je většinou vyrobeno z vrstvených pásků elektrotechnické oceli. Jádro je vyrobeno navinutím pásku do požadovaného tvaru a drážky jsou pak vytvořeny frézováním. Alternativou je vyražení otvorů pro drážky do pásku s měnicí se vzdáleností mezi jednotlivými otvory a poté svinutí pásku do tvaru jádra statoru. Tato metoda umožňuje též vytvořit zešíkmení drážek a tak zmenšit působení vyšších harmonických. Dalším možným postupem

je vytvoření jádra ze segmentů, které jsou složeny z pásů elektrotechnické oceli o rovnoměrné šířce pro jednoduchost skládání. Pásek má příčné drážky pro jednotlivé ohyby, konečný tvar je zafixován pomocí pásy obr 4.6. Pro tvorbu magnetického obvodu lze také z různě odstupňovaných plechů vytvořit pólové nástavce. [3] [21]



Obr. 4. 6 Segment jádra statoru vyrobeného z ocelového pásu. 1 – ocelový pásek, 2 – drážka, 3 – složení pásu, 4 – slisovaný pásek, 5 – kompletní segment

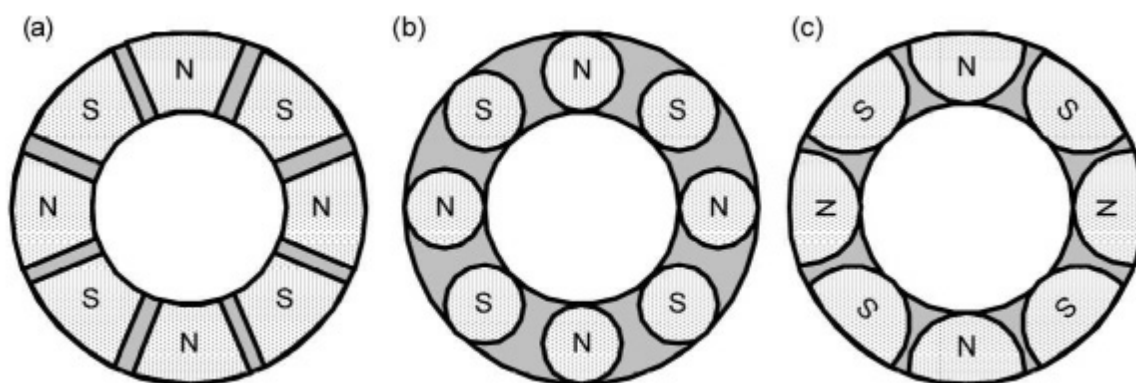
Pro hromadnou výrobu jádra statoru jsou výhodnější z hlediska nákladů materiály vyrobené práškovou technologií (Somaloy). Pomocí této technologie je možné vyrobit jádro statoru a na něm vyniklé póly pro cívku, nebo vytvořit samostatné póly. Prášky dosahují větší pevnosti než u oceli. Na výběru materiálu závisí ztráty v jádře statorou. Ty jsou udávány ve W/kg při hodnotě magnetické indukce 1 nebo 1,5 T.[3] [21]



Obr. 4. 7 Statory pro malé jednostranné axiální motory vyrobeny z práškových materiálů

4.3.2. Rotor

Magnetický obvod rotoru je složen z podložek či disků zhotovených z měkké oceli. Axiální stroje mají větší vzduchovou mezeru než stroje radiální, to by mělo být zohledněno magnety s velkou hustotou energie. K podložce jsou magnety připevněny buď přímo na disk, nebo do opěrných prstenců s dutinou pro magnet. Pro připevnění magnetů jsou používány silikonová, akrylátová nebo epoxidová lepidla. Na pevnost lepidla je minimální požadavek 20 MPa. V disku rotoru se vytváří ztráty vlivem pulzujícího magnetického toku, vnikajícího při rychlé změně vzduchové mezery, to je případ průchodu disku nad zuby statorového jádra. [3] [21]



Obr. 4. 8 Tvary magnetů na diskovém rotoru: a) lichoběžníkový, b) kruhový, c) půlkruhový [3]

4.3.3. Vinutí

Vinutí axiálních strojů je stejně jako u radiálních strojů nejčastěji prováděno z izolovaných měděných vodičů kruhového nebo čtvercového průřezu, který zlepšuje plnění cívky, ale hůře se s ním cívky navíjí. Vodiče se vyrábí pomocí válcování nebo tažení, tak se dají získat vodiče od průměru 0,005mm. Pro dobrou práci s vinutím dle literatury [3] se nedoporučuje průměr vodiče větší než 1,5mm, pokud proudová hustota vyžaduje větší průměr vodiče, je vhodnější použít paralelní vinutí. Vinutí je možno konstruovat jako jednovrstvé nebo dvouvrstvé.

Pro návrh 3f vinutí a počtu cívek v závislosti na počtu pólů je možno vycházet z tab. 4. 1. Hodnoty jsou dány geometrií stroje tak, aby magnety prošly ve stejném okamžiku nad cívkami téže fáze a tím se ve všech indukovala stejná hodnota napětí.

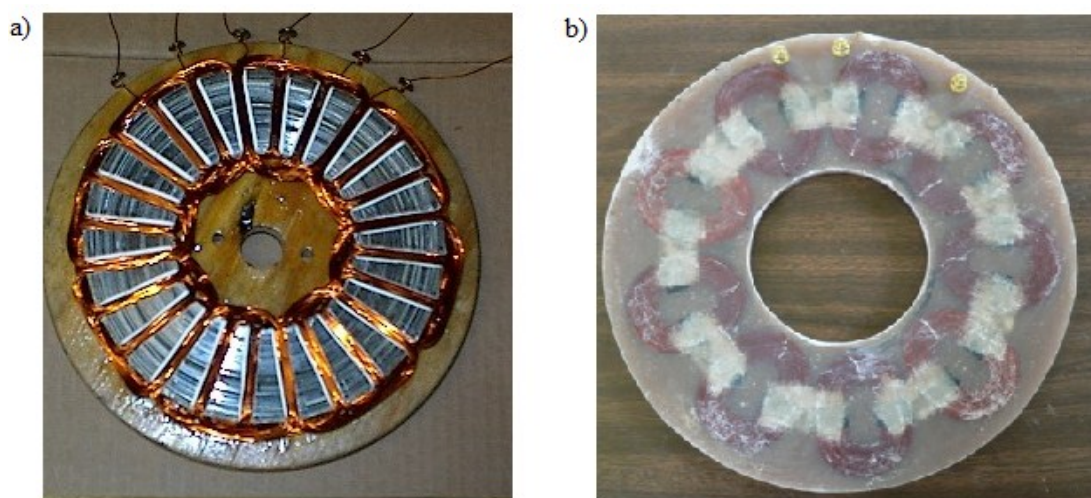
Tab. 4. 1 Hodnoty počtu cívek v závislosti na počtu pólů pro 3f vynutí

Počet pólů	Počet cívek v jedné fázi	Celkový počet cívek
8	2	6
12	3	9
16	4	12
20	5	15
24	6	18

K upevnění vinutí se používají epoxidové nebo silikonové pryskyřice. Moderním způsobem je fixace pomocí lepidla nanášeného přímo na vodič, a jeho složky se aktivují až zahřátím. Při použití statoru bez jádra je vhodné cívky vhodným způsobem zafixovat již na navíječce, aby po jeho sejmutí nedošlo k deformaci a zachovalo si svůj požadovaný tvar. Poté je celé vinutí zalité do epoxidové pryskyřice. Vinutí je nejčastěji provedeno jako třífázové zapojené do trojúhelníka nebo do hvězdy. Jeho maximální provozní teplota je dána třídou jeho izolace. Oteplení vinutí je způsobeno ztrátami ve vinutí, jež jsou způsobeny průchodem proudu. Ztráty v mědi lze přibližně vyjádřit:

$$P_{zCu} = R \cdot I^2 [W; \Omega, A] \quad (4.2)$$

kde R je odpor vinutí
 I je proud procházející vinutím



Obr. 4. 9 Vinutí statoru: a) uložené v železném jádře b) zalité v epoxidu

4.4. Výpočet

Nejdůležitějším parametrem pro výpočet axiálního stroje je jeho vnější průměr. Při návrhu vnějšího průměru můžeme vyjít z empirických vzorců nebo v praxi běžně používané metody návrhu na základě existujících strojů. V této kapitole bude teoreticky výpočet na základě známých parametrů generátoru. Tento výpočet bude sloužit k zhodnocení nasimulovaného generátoru a dopočtení parametrů potřebných pro vytvoření modelu:.

Parametry generátoru:

Délka vodiče pod magnetem:	$l_v =$	0,042 m
Rozměr magnetu:	$L \times W \times T =$	$40 \times 20 \times 5$ mm
Průměr rotoru:	$D_{out} =$	242 mm
Tloušťka rotoru:	$t_{rot} =$	4 mm
Střední průměr uložení magnetů na rotoru:	$D_{Mavg} =$	200 mm
Jmenovité otáčky rotoru:	$n_{rot} =$	375 ot/min
Počet závitů v jedné cívce	$N_{cv} =$	29 zav
Počet cívek	$S_1 =$	16
Počet fází	$m =$	1
Velikost vzduchové mezery	$\delta =$	24mm

Počet pólů generátoru se zvolí dle jmenovitých otáček za minutu, při kterých má stroj pracovat na požadovanou výstupní frekvenci. Používaná frekvence u nás je 50Hz, předpokládané jmenovité provozní otáčky jsou 375ot/min. Ze vzorce (2.2), udávající závislost frekvence na otáčkách, vyjádřím počet pár pólů:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} [-] \quad (4.3)$$

kde f -frekvence,
 n -otáčky
 p -počet pól párů

$$p = \frac{60 \cdot f}{375} = 8 \quad (4.4)$$

pak počet pólů stroje je:

$$2p = 16 \quad (4.5)$$

Přičemž vinutí generátoru je jednofázové a tvoří ho 16 cívek zapojených do série. Potom je počet drážek na pól $Q_p=2$ a celkový počet je roven:

$$Q = Q_p \cdot 2p = 2 \cdot 16 = 32 \quad (4.6)$$

počet drážek na pól a fázi je:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{32}{16 \cdot 1} = 2 \quad (4.7)$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Magnetickou indukci ve vzduchové mezeře vypočítám dle vztahu z [4]. Tento vzorec je možné použít za předpokladu, že permeabilita magnetu je přibližně stejná jako u vzduchu.

$$V_M = \frac{B_\delta^2 \cdot V_\delta}{\mu_0 \cdot B_M \cdot H_M} [m^3] \quad (4.8)$$

kde V_M – objem magnetu
 B_δ – indukce ve vzduchové mezeře
 V_δ – objem vzduchové mezery
 μ_0 – permeabilita vakua
 B_M – magnetická indukce magnetu
 H_M –intenzita magnetu

Z něj mohu vyjádřit magnetickou indukci ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \sqrt{\frac{V_M \cdot \mu_0 \cdot B_M \cdot H_M}{V_\delta}} [T] \quad (4.9)$$

Objem vzduchové mezery stanovím jako:

$$V_{\delta} = S_{\delta} \cdot \delta \text{ [m}^3\text{]} \quad (4.10)$$

kde S_{δ} - plocha vzduchové mezery

δ - velikost vzduchové mezery

Plochu mezery určím ze známého vnějšího ($R_{out} = 0,121\text{m}$) a vnitřního poloměru ($R_{in} = 0,079\text{m}$).

$$S_{\delta} = \pi \cdot (R_{out}^2 - R_{in}^2) = \pi \cdot (0,121^2 - 0,079^2) = 0,0263\text{m}^2 \quad (4.11)$$

Velikost vzduchové mezery je $\delta = 0,024\text{ m}$, pak celkový objem vzduchové mezery je dle (4.10):

$$V_{\delta} = S_{\delta} \cdot \delta = 0,0263 \cdot 0,024 = 6,31 \cdot 10^{-4}\text{m}^3 \quad (4.12)$$

Objem jednoho magnetu vypočtu z jeho rozměrů a ty jsou pro délku, šířku, výšku $L \times W \times T = 42 \times 20 \times 5\text{mm}$:

$$V_m = L \cdot W \cdot T = 0,042 \cdot 0,02 \cdot 0,004 = 3,36 \cdot 10^{-6}\text{m}^3 \quad (4.13)$$

Protože je stroj symetrický, můžu řešit indukci ve vzduchové mezeře pro jednu pólovou rozteč. Objem vzduchové mezery je pak šestnáctinový a objem magnetu je roven dvěma magnetům (hornímu a dolnímu). Hodnoty $B_M = 1,2\text{ T}$ a $H_M = 900\text{ kA/m}$ jsou zvoleny z tabulky 3.4.. Ve vzduchové mezeře pak je indukce vzduchové mezery:

$$\begin{aligned} B_{\delta} &= \sqrt{\frac{(2 \cdot V_m) \cdot \mu_0 \cdot B_M \cdot H_M}{\frac{V_{\delta}}{16}}} = \sqrt{\frac{(2 \cdot 3,36 \cdot 10^{-6}) \cdot 1,2566 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 \cdot 9 \cdot 10^5}{\frac{6,31 \cdot 10^{-4}}{16}}} \\ &= \sqrt{\frac{9,11 \cdot 10^{-6}}{3,94 \cdot 10^{-5}}} = \sqrt{0,231} = 0,48\text{ T} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Magnetický tok

Magnetický tok je spočítán ze vztahu (3.1) velikost indukce je vypočtena v (4.14) a plocha vzduchové mezery v (4.11) pro jeden pól je třeba uvažovat šestnáctinu plochy.

$$\phi_{max} = B_{\delta} \cdot S_{\delta} = 0,47 \cdot \frac{0,0263}{16} = 7,72 \cdot 10^{-4}\text{ Wb} \quad (4.15)$$

Protože byla indukce vypočítána bez uvažování rozptylu, je třeba zavést činitel rozptylu v literatuře [4] je uvedeno, že může dosáhnout hodnoty 4 já volím hodnotu $q_r = 2$, pak je tok ve vzduchové mezeře:

$$\phi_{\delta} = \frac{\phi_{max}}{2} = \frac{7,72 \cdot 10^{-4}}{2} = 3,86 \cdot 10^{-4}\text{ Wb} \quad (4.16)$$

Indukované napětí

Indukované napětí generátoru je vypočítáno dle vzorce (2.1) Hodnota činitele k_{v1} vinutí se volí v rozmezí 0,8 až 0,95 mnou zvolená hodnota je 0,93.

$$U_i = 4.44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 464 \cdot 0.93 \cdot 3,86 \cdot 10^{-4} = 36,9 \text{ V} \quad (4.18)$$

Efektivní hodnota napětí:

$$U_{ef} = \frac{U_i}{\sqrt{2}} = \frac{36,9}{\sqrt{2}} = 26,1 \text{ V} \quad (4.19)$$

Při návrhu je třeba mít na paměti, že na výstupních svorkách bude mít menší napětí o hodnotu úbytku napětí na impedanci cívky.

Odpor vinutí

Odpor vinutí nebyl znám, proto se jeho hodnota musela určit. Pro odpor vinutí je třeba znát geometrii cívek. Pro určení střední délky jednoho závitu v mém případě, jsem mohl délku určit při tvorbě modelu (uvedeného v kapitole 5) a má hodnotu $l_{zav} = 0,1625\text{m}$ z počtu závitů pro jednu cívku $N = 29$ a počtu cívek (16) je možné určit celkovou délku vynutí:

$$l_{vin} = l_{zav} \cdot N \cdot 16 = 0,1625 \cdot 29 \cdot 16 = 75,4\text{m} \quad (4.20)$$

Pro odpor je třeba znát ještě průřez vodiče, který pro použitý vodič o průměru $D_{vod} = 0,9\text{mm}$ je $S_{vod} = 1,63 \cdot 10^{-7}\text{m}^2$ a rezistivitu mědi $\rho_{Cu} = 1,75 \cdot 10^{-8}$ (pro 20°C) pak je odpor při 20°C :

$$R_{vin} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{vin}}{S_v} = \frac{1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 75,4}{1,6305 \cdot 10^{-7}} = 2,093\Omega \quad (4.21)$$

Pro stroje je však nutno počítat z vyšší pracovní teplotou proto přepočítám odpor vinutí na hodnotu při 40°C , k tomu je třeba znát teplotní součinitel odporu mědi $\alpha_{Cu} = 0,004$ pak je odpor:

$$R_{40} = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta\theta) = 2,093 \cdot (1 + 0,004 \cdot 20) = 2,26\Omega \quad (4.22)$$

Ve statoru jsou dvě stejná vinutí pro větší hodnoty proudu, proto je nutno vypočíst celkový odpor:

$$R_c = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,26 \cdot 2,26}{2,26 + 2,26} = 1,13\Omega \quad (4.23)$$

5. Model axiálního generátoru

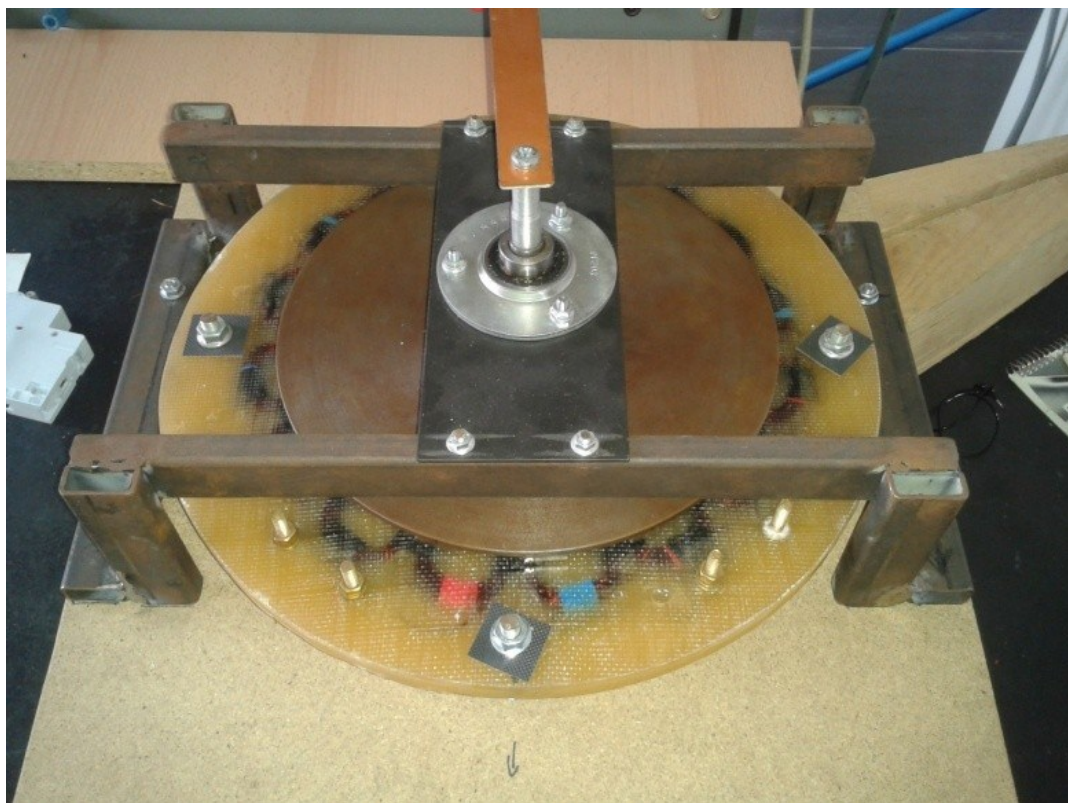
Model axiálního generátoru je vytvořen na základě reálného generátoru, který byl v bakalářských pracích [6] [19] změřen. O tyto hodnoty se bude opírat simulace při ověřování správnosti nasimulovaných parametrů. Po ověření správnosti simulace budou navrženy různé druhy optimalizace generátoru a jejich zhodnocení z hlediska účinnosti generátoru. Model generátoru je vytvořen za pomoci dvou softwarových programů a to SolidWorks a Ansys Maxwell. V prvním zmíněném programu SolidWorks je vytvořena geometrie součástí generátoru a jeho sestavení do celku. V programu Ansys Maxwell je provedena elektromagnetická analýza modelu simulace navržených optimalizačních úprav.

5.1. Konstrukce simulovaného generátoru

Simulovaný generátor je konstruován jako axiální s oboustranným rotorem a statorem uprostřed. Rotory jsou zhotoveny z oceli e355 (dříve značné jako 11600) a osazeny magnety NdFeB typu 35, vlastnosti tohoto typu magnetu jsou uvedeny v tabulce 3.4 Magnety jsou obdélníkového tvaru o rozměrech 42x20x5mm. Na rotor jsou tyto magnety připevněny pomocí lepidla. Na jeden rotor připadá 16 těchto magnetů. Umístěny jsou tak, že se střídá jejich polarita S-J-S-J-S... naproti nim na druhém disku magnety s opačnou polaritou J-S-J-S-J.... Tím je docíleno uzavření magnetického obvodu přes vníklé póly. Mezi tyto rotory je vložený stator se vzduchovými cívkami, tyto cívky jsou zalité v epoxidové pryskyřici. Typ a tvar magnetů byl v době tvorby tohoto generátoru omezen možnostmi trhu. Generátor byl vytvořen se záměrem pro dobíjení baterií a je konstruován, jako jednofázový se dvěma paralelními vinutími. Parametry generátoru jsou uvedeny v kapitole (4. 4.).



Obr. 5. 1 Dvojité vnější motor

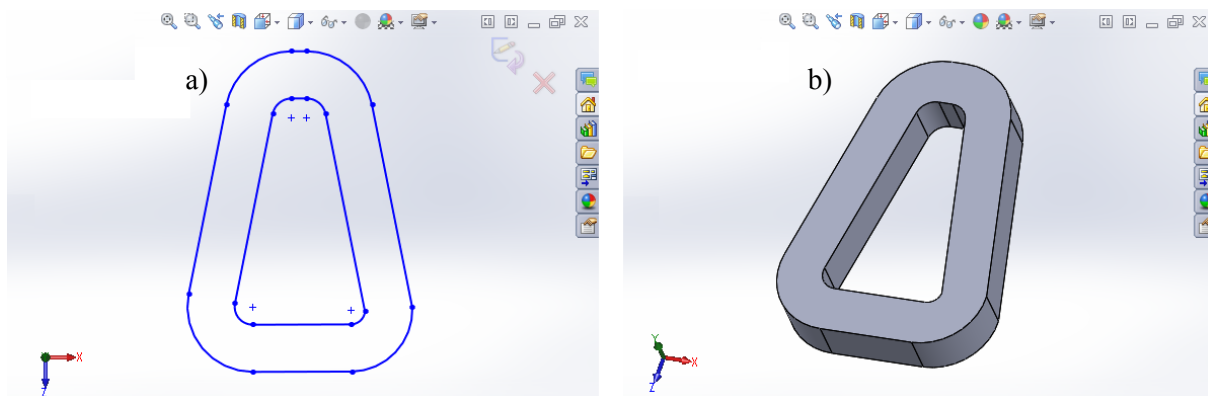


Obr. 5. 2 Kompletní generátor se satorovým vynutím zalitým v epoxidové pryskyřici

5.2. SolidWorks

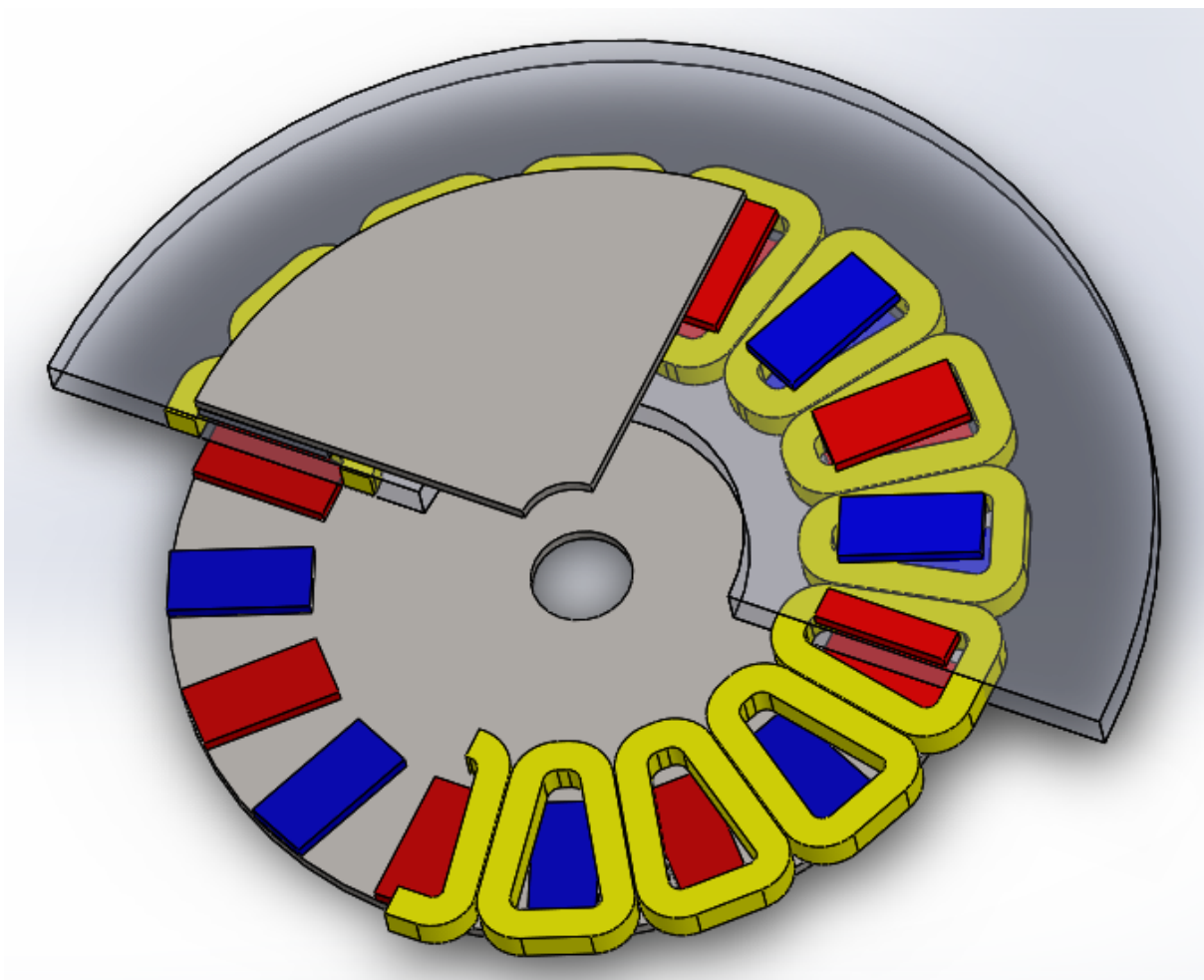
SolidWorks je jeden z neúspěšnějších 3D CAD programů na českém trhu. Slouží pro ověření návrhu a disponuje možností přechodu od 2D návrhu k 3D. Má mnoho prvků pro úpravu návrhu (úkosy, zaoblení, zrcadlení, křivosti, atd.). Má možnost uložení projektu ve spoustě formátů, což umožňuje další práci s návrhem v jiném programu. Má intuitivní pracovní prostředí a je v české lokalizaci. Umožňuje spojování jednotlivých vytvořených dílů do vyšších sestav, při změně jednoho dílu, jenž je začleněn do sestavy se změna projeví v celé sestavě, pokud je to žádoucí a není třeba dodatečných úprav. Tyto se spoustou dalších nástrojů zvyšují produktivitu při tvorbě návrhů a omezují počet operací k dosažení požadovaného výsledku. Proto byl program SolidWorks vybrán pro tvorbu geometrie modelu.

Tvorba geometrie modelu probíhala v několika krocích. Nejprve jsem vytvořil jednotlivé díly tak, že byla dle rozměrů jednotlivých komponent vytvořena 2D skica, která byla po dokončení převedena do 3D modelu.



Obr. 5. 3 a) vytvořená 2D skica cívky b) cívka po převedení do 3D

Po vytvoření všech dílů následovalo spojení dílů do výsledné sestavy. Po jejím vytvoření byla sestava uložena do formátu „Parasolid (*.x_t)“, aby s ní mohlo být pracováno v programu Ansys Maxwell.

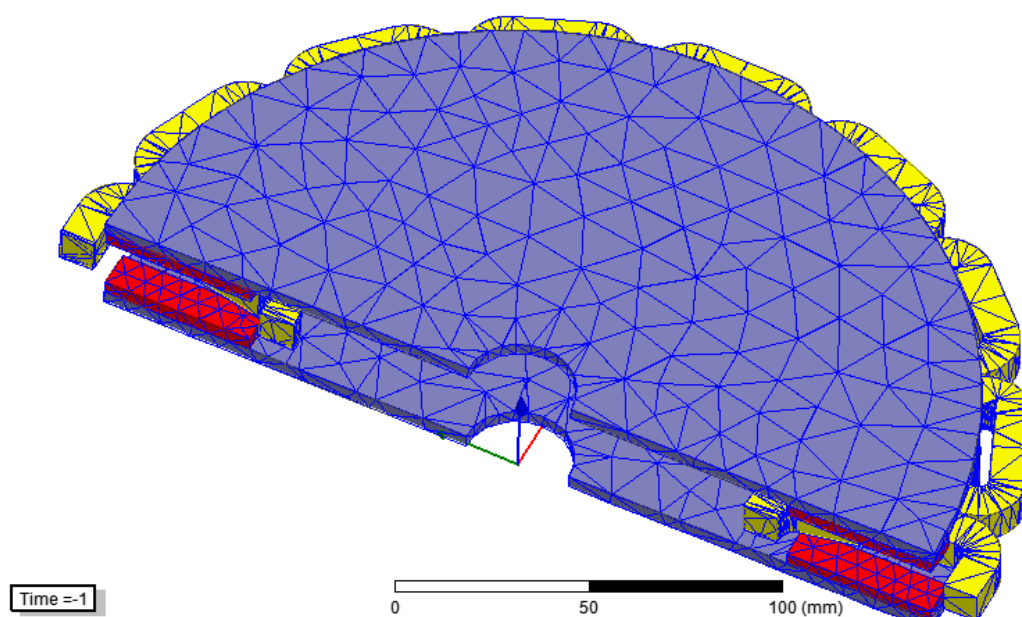


Obr. 5. 4 Řez kompletním modelem generátoru

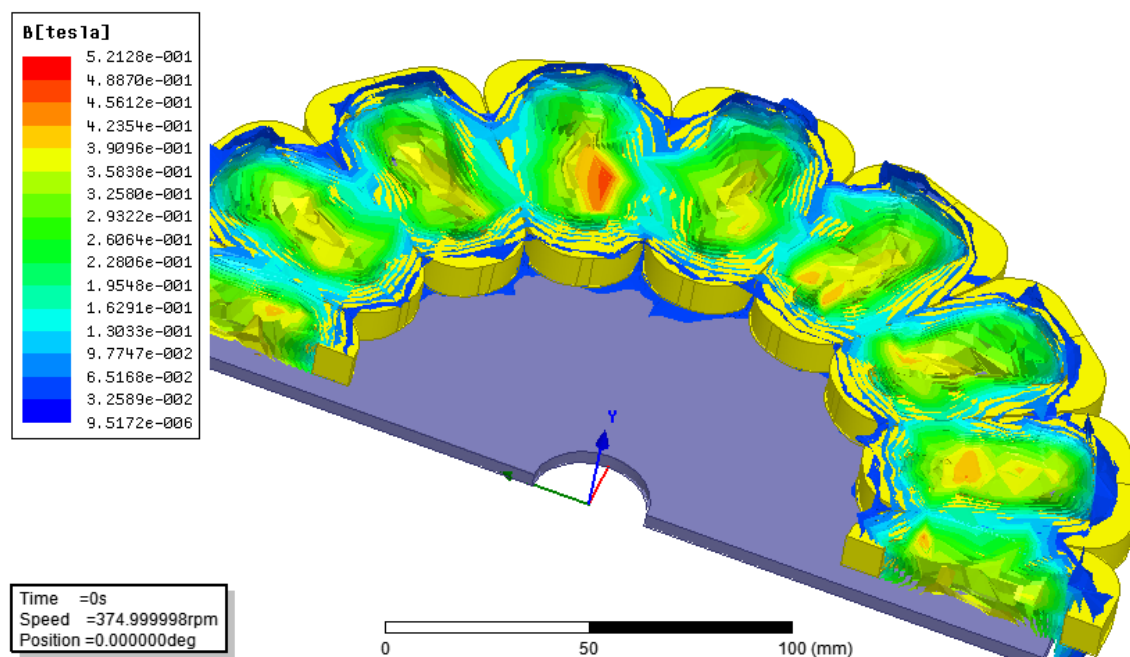
5.3. Ansys Maxwell

Jedná se o softwarový program určený k simulaci elektromagnetických polí při analýze, pohonů, motorů, transformátorů a senzorů. Pro svou práci využívá metody konečných prvků a umožňuje simulace v časové i frekvenční oblasti. Hlavním přínosem je automatický proces řešení, ve kterém je po uživateli vyžadováno zadání řešené geometrie, přiřazení vlastností materiálu zvolením požadovaných výstupních veličin. Po správně nastaveném modelu a vstupních veličinách nastává automatické řešení zadané úlohy. Program má také možnost extrahovat stavové modely z konečně prvkových simulací a je schopen spolupráce s programy (Simplorer, Rmxprt, RExprt, Workbench). Díky těmto vlastnostem se stává Ansys Maxwell efektivním a přesným nástrojem pro efektivní simulace. [20]

Po vytvoření geometrie jsem provedl importaci modelu do programu Ansys Maxwell. Zde jsem přiřadil jednotlivým dílům vlastnosti materiálů. Poté bylo nutné zadat parametry vinutí, které je složeno z 16-ti cívek a každá má 29 závitů. Stator obsahuje dvě vinutí, ty jsou spojeny paralelně. Odpor vinutí je vypočítán v kapitole 4. Ta je spočtena pro pracovní teplotu 40°C. U magnetů bylo nutné zadat správnou orientaci vzhledem k ose otáčení. Důležité bylo správně nastavit výpočtovou síť, aby simulace byla dostatečně přesná, ale ne neúměrně náročná na výpočetný čas. Stejně důležité z hlediska náročnosti na čas a dostatečnou přesnost je nastavení doby simulace a jejího kroku. Protože je model symetricky byl rozdělen na dvě půlky pro zkrácení výpočetního času.

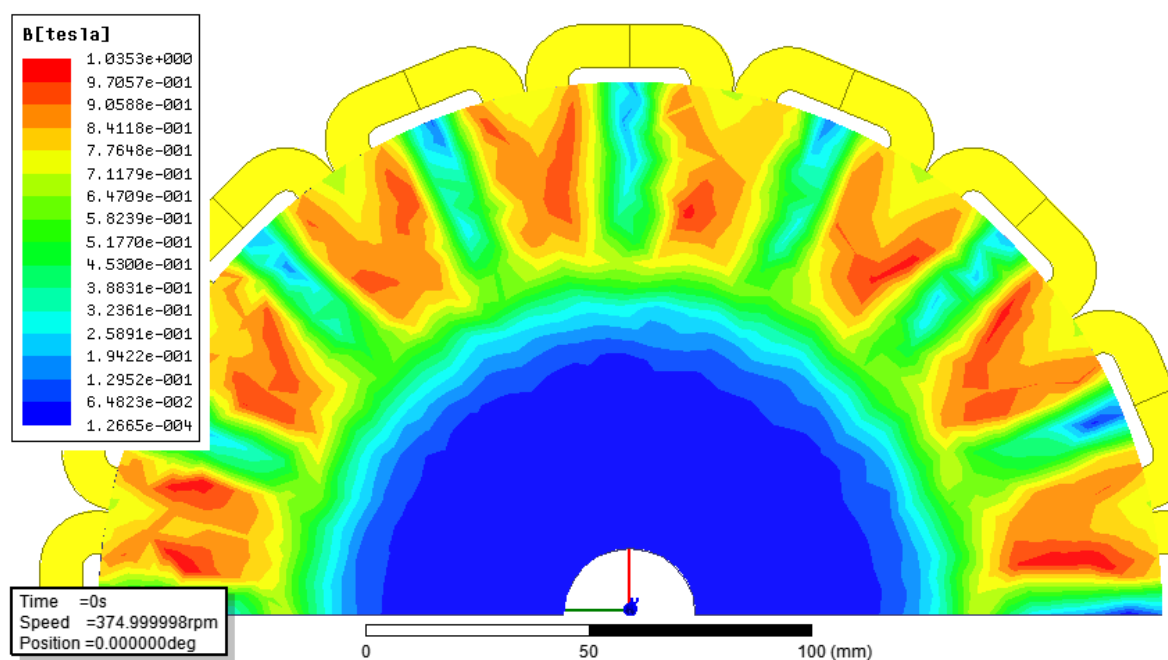


Obr. 5. 5 Ukázka použité sítě pro simulaci



Obr. 5. 6 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Na obrázku je vidět průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře průměrná hodnota odečtená z obrázku je 0,35 T. Vypočtená hodnota bez uvažování rozptylu je 0,48T.



Obr. 5. 7 Indukce v disku rotoru

Na obrázku je vidět magnetická indukce v disku rotoru, kde lze odečíst její nejvyšší hodnotu, která dosahuje 1T. Což je ještě pod hodnotou nasycení oceli e335 (11600) z níž je rotor vyroben.

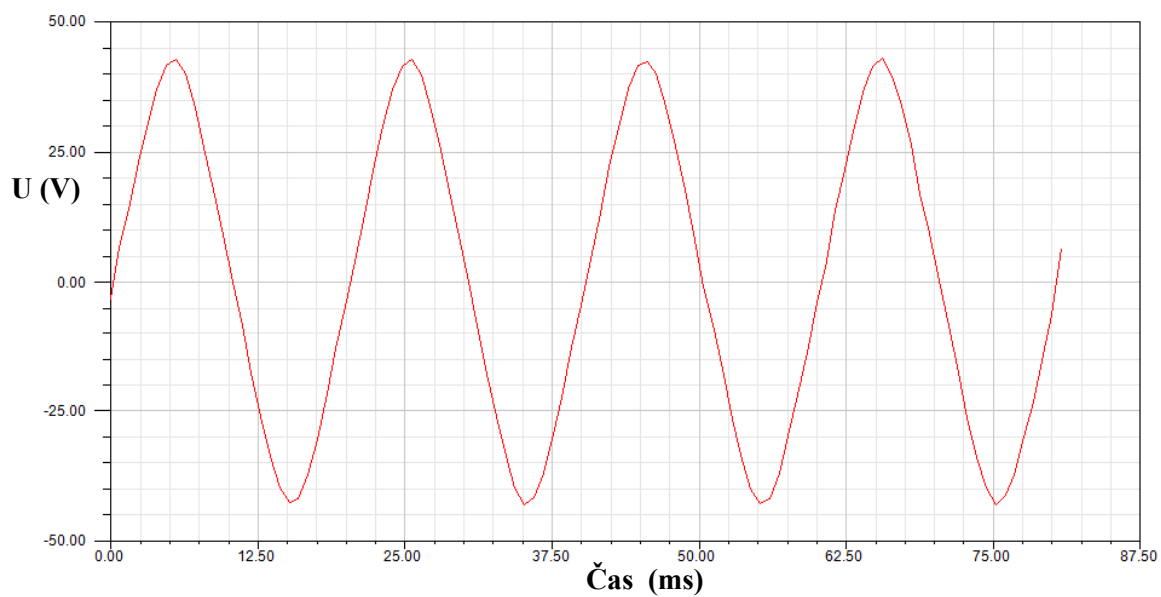
5.4. Porovnání modelu se skutečným generátorem

5.4.1. Napětí na prázdko

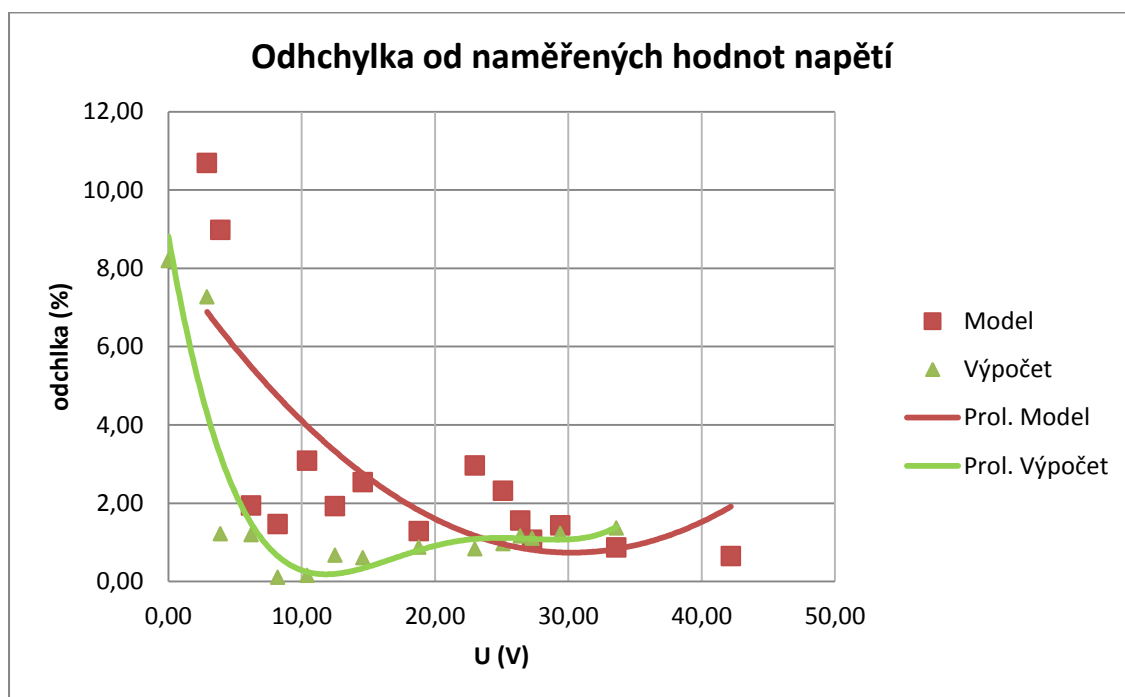
V praxi je měření napětí na prázdko realizováno na rozpojených svorkách generátoru. V simulaci tohoto stavu byl dosaženo vložením velkého odporu ($1\text{M}\Omega$). Měření slouží k ověření návrhu stoje jeho provedení a také jako kontrola vinutí. Stroj s permanentními magnety má konstantní buzení proto se jeho výstupní napětí mění v závislosti na otáčkách. Hodnoty jsou porovnávány s naměřenými v [4]

Tabulka 5. 1 Hodnoty napětí v závislosti na otáčkách

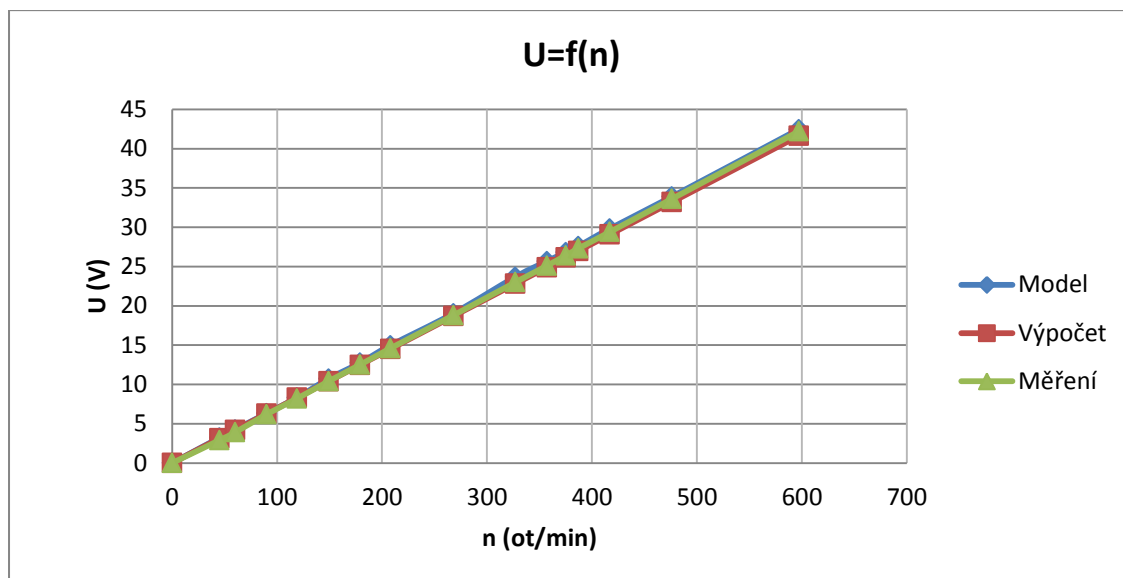
n (ot/min)	U (V) (model)	U (V) (měření)	U (V) (Výpočet)
45	3,21	2,90	3,13
60	4,25	3,90	4,18
90	6,32	6,20	6,2
119	8,32	8,20	8,2
149	10,72	10,40	10,3
179	12,74	12,50	12,4
208	14,97	14,60	14,5
268	19,04	18,80	18,6
327	23,68	23,00	22,8
357	25,68	25,10	24,9
375	26,81	26,40	26,1
387	27,59	27,30	26,9
417	29,82	29,40	29
476	33,89	33,60	33,1
597	42,47	42,20	41,62



Obr. 5. 8 Průběh napětí na prázdko pro $n=375$ ot/min



Graf 5. 1 Procentuální odchylka modelu a výpočtu od naměřených hodnot.



Graf 5. 2 Závislost napětí na otáčkách

Závěr:

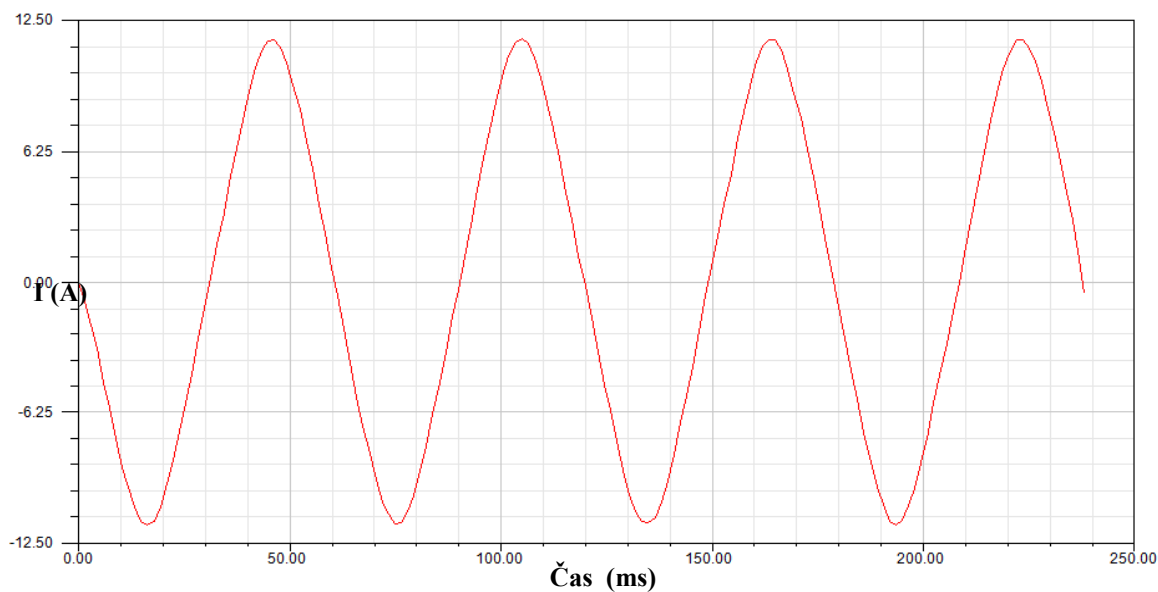
Naměřené, vypočtené a namodelované hodnoty jsou srovnány procentuální odchylkou v grafu 5. 1. Z hodnot je vidět, že se odchylka modelu s rostoucí hodnotou napětí zmenšuje stejně i hodnota vypočtená. Velký rozdíl u malých hodnot otáček mohly způsobit použité měřicí přístroje, protože při velmi malých hodnotách frekvence se pohybujeme na hranici nebo za hranicí měřicího rozsahu přístroje, což může vést k nepřesnostem. Větší chybu je způsobena důsledkem volby proměnných s kterými je počítáno. Obecně jde říci, že simulace indukovaného napětí je provedena s dostatečnou přesností. V grafu 5. 2. je také vidět lineární závislost napětí na otáčkách.

5.4.2. Proud na krátko

Při měření na krátko jsou výstupní svorky zkratovány. Pro generátor s permanentními magnety se využívá měření proudu v závislosti na otáčkách na rozdíl od strojů s budícím vinutím, kde se měření provádí v závislosti na budícím proudu.

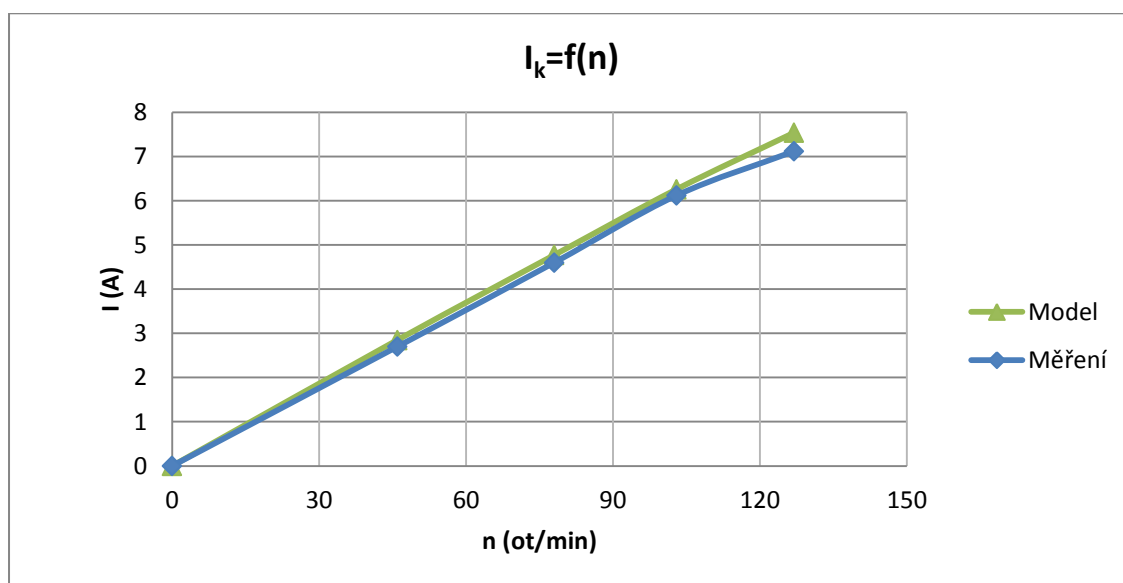
Tabulka 5. 1 Hodnoty proudu na krátko

n (ot/min)	I _K (A) Model	I _K (A) Měření
0	0	0
46	2,85	2,7
78	4,77	4,6
103	6,26	6,12
127	7,54	7,12



Obr. 5. 9 Průběh proudu na krátko pro $n=127$ ot/min

Graf:



Graf 5. 3 Proud na krátko v závislosti na otáčkách

Závěr:

V grafu je vidět že hodnota reálná a simulovaná se příliš neliší, neprenosnost se objevuje až na konci grafu. Graf je sestaven z malého počtu hodnot, protože cívky byly navrženy pro maximální pracovní proud 2,5A a to omezovalo rozsah měření. Při měření bylo dosaženo největší hodnoty 7,12A to je také možná příčina rozdílu v grafu, protože při tomto měření se mohlo vinutí nadměrně zahřát a zvětšit svůj odpor. V modelu je možno simulovat i hodnotu pro jmenovité otáčky a ta dosahuje 21,6 A v do grafu nebyla zanesena proto, abych jej mohl porovnat. Stejně jak u napětí je i u proudu vidět lineární závislost na otáčkách.

5.4.3. Měření při odporové zátěži

Toto měření umožňuje měření účinnosti generátoru. Je provedeno změnami odporu při konstantních otáčkách. V praxi je u menších strojů snadno měřitelný výkon s dostatečnou přesností ampérmetrem a voltmetrem. Pro měření mechanického příkonu se používá měřícího dynamometru, pro změření mechanického momentu a otáčkoměru pro měření otáček. Z těchto hodnot se určí účinnost. Porovnáváno s naměřenými hodnotami v [4].

Příklad výpočtu viz. zvýrazněný řádek v tabulce 5. 4. nasimulovaných hodnot, výkon generátoru se určí:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 27,2 \cdot 0,6 \cdot 1 = 16,4 \text{ W} \quad (5.1)$$

kde P – výkon

U – napětí

$\cos\varphi$ – účinník (pro čistě odporovou zátěž lze považovat za 1)

Příkon generátoru je:

$$P_p = M \cdot \omega \text{ [W]} \quad (5.2)$$

kde P_p – příkon

M – točivý moment

ω – úhlová rychlost

ω je rovna:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 375}{60} = 39,3 \text{ rad/s} \quad (5.3)$$

Pak:

$$P_p = M \cdot \omega = 0,9 \cdot 39,3 = 35,5 \text{ W} \quad (5.4)$$

Účinnost se určí jako:

$$\eta = \frac{16,4}{35,5} \cdot 100 = 46,1\% \quad (5.5)$$

Namodelované a naměřené hodnoty:

Naměřené hodnoty z kterými bude simulace porovnávána jsou převzaty z literatury [4]

Tabulka 5. 3 Namodelované hodnoty odporové zátěže pro $n=150$ ot/min

n (ot/min)	U_i (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
150	11,0	0,1	0,4	15,7	6,9	1,6	23,6
150	10,8	0,3	0,5	15,7	8,5	3,1	36,8
150	10,6	0,4	0,6	15,7	10,0	4,5	45,3
150	10,5	0,6	0,7	15,7	11,5	5,9	51,0
150	10,7	0,7	0,9	15,7	13,4	7,8	58,2
150	10,4	0,9	1,0	15,7	15,2	9,4	61,5
150	9,9	1,0	1,0	15,7	16,3	10,1	61,7
150	9,6	1,2	1,2	15,7	18,8	11,8	62,5
150	9,4	1,4	1,3	15,7	20,9	13,2	63,3
150	9,1	1,7	1,5	15,7	23,6	15,0	63,6
150	12,1	2,1	2,5	15,7	39,1	25,0	63,8

Tabulka 5. 4 Naměřené hodnoty odporové zátěže pro $n=150$ ot/min [4]

n (ot/min)	U_i (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (W)	η (%)
150	10,3	0,14	0,29	15,7	4,6	1,4	31,7
148	10,17	0,29	0,42	15,5	6,5	2,9	45,3
147	10,03	0,42	0,54	15,4	8,3	4,2	50,7
146	9,99	0,55	0,6	15,3	9,2	5,5	59,9
145	9,7	0,78	0,83	15,2	12,6	7,6	60,0
143	9,3	1,15	1,15	15,0	17,2	10,7	62,1
142	9,1	1,39	1,38	14,9	20,5	12,6	61,6
140	8,79	1,65	1,58	14,7	23,2	14,5	62,6
137	8,4	2	1,94	14,3	27,8	16,8	60,4
133	7,8	2,5	2,36	13,9	32,9	19,5	59,3

Tabulka 5. 5 Namodelované hodnoty odporové zátěže pro $n=375$ ot/min

n (ot/min)	U_i (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
375	27,7	0,2	0,8	39,3	31,7	4,3	13,6
375	27,5	0,3	0,7	39,3	27,7	8,3	29,9
375	27,3	0,5	0,8	39,3	31,6	12,3	39,1
375	27,2	0,6	0,9	39,3	35,5	16,4	46,1
375	26,7	1,0	1,2	39,3	45,9	26,8	58,3
375	26,3	1,3	1,4	39,3	53,7	34,4	64,0
375	25,9	1,7	1,6	39,3	63,9	44,0	68,9
375	25,4	2,1	1,9	39,3	74,2	53,4	70,9

Tabulka 5. 6 Naměřené hodnoty odporové zátěže pro $n=375$ ot/min [4]

n (ot/min)	U_i (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (W)	η (%)
375	26,8	0,13	0,4	39,3	15,7	3,5	22,2
375	26,7	0,24	0,5	39,3	19,6	6,4	32,6
375	26,5	0,45	0,7	39,3	27,5	11,9	43,4
374	26,2	0,68	0,9	39,2	35,2	17,8	50,5
371	25,8	1,02	1,18	38,9	45,8	26,3	57,4
370	25,5	1,29	1,4	38,7	54,2	32,9	60,6
366	25	1,7	1,8	38,3	69,0	42,5	61,6
363	24,6	2,15	2,2	38,0	83,6	52,9	63,2

Tabulka 5. 7 Namodelované hodnoty odporové zátěže pro $n=600$ ot/min

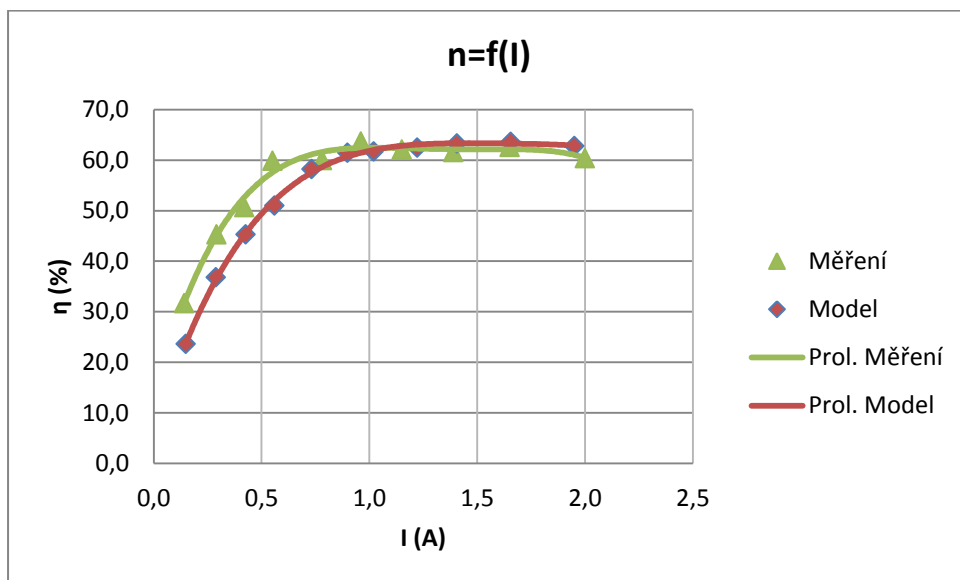
n (ot/min)	U_I (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
600	42,9	0,2	0,5	62,8	30,8	6,4	20,9
600	42,7	0,3	0,6	62,8	40,0	12,8	32,1
600	42,5	0,5	0,8	62,8	47,8	19,2	40,1
600	42,3	0,6	0,9	62,8	54,0	25,5	47,1
600	41,8	1,0	1,2	62,8	73,6	42,0	57,0
600	41,5	1,3	1,4	62,8	87,6	54,1	61,7
600	41,0	1,7	1,7	62,8	103,9	69,9	67,2
600	40,5	2,1	1,9	62,8	119,4	85,3	71,4

Tabulka 5. 8 Naměřené hodnoty pro $n=600$ ot/min [4]

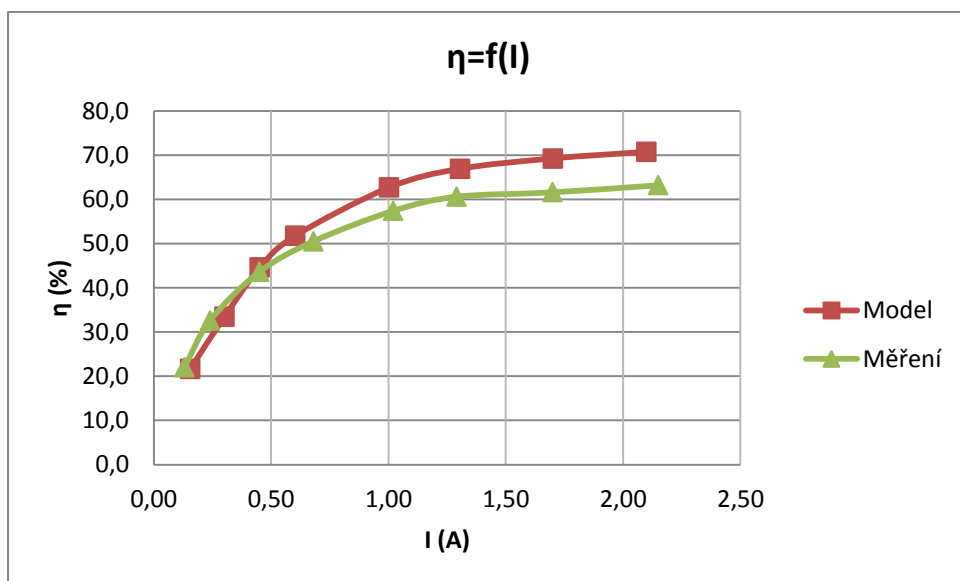
n (ot/min)	U_i (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (W)	η (%)
600	42,5	0,21	0,6	62,8	37,7	8,9	23,7
595	42,3	0,34	0,72	62,3	44,9	14,4	32,1
594	42,2	0,48	0,83	62,2	51,6	20,3	39,3
593	42,1	0,57	0,9	62,1	55,9	24,0	42,9
592	41,7	0,95	1,23	62,0	76,3	39,6	52,0
588	41,3	1,25	1,5	61,6	92,4	51,7	56,0
587	40,9	1,54	1,74	61,5	107,0	63,0	58,9
585	40,6	1,82	2	61,3	122,5	73,9	60,3
581	40,2	2,16	2,29	60,8	139,3	86,8	62,3
574	39,3	2,8	2,8	60,1	168,3	110,0	65,4

Grafy

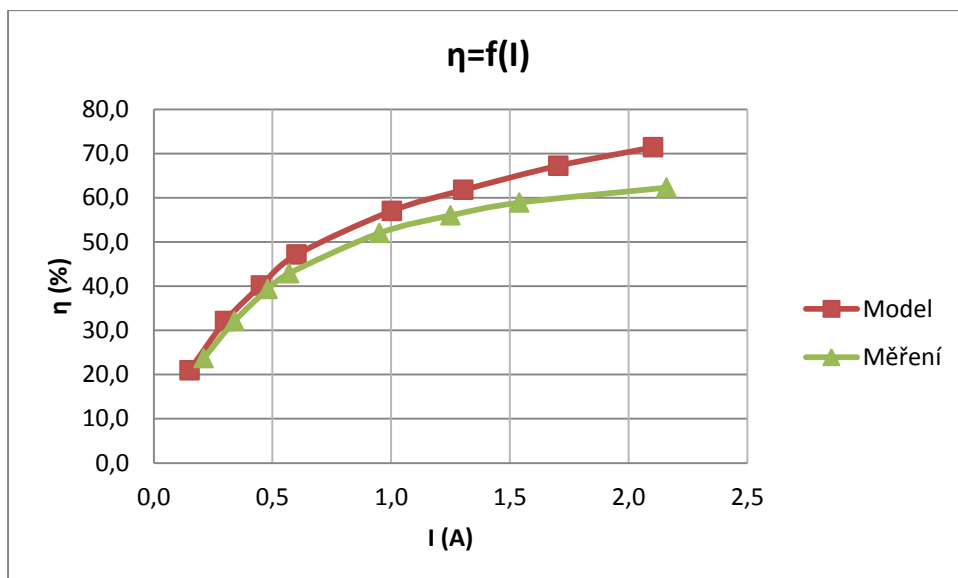
Grafy porovnávající naměřené a namodelované hodnoty .



Graf 5. 4 Závislost účinnosti na proudu pro $n=150$ ot/min



Graf 5. 5 Závislost účinnosti na proudu pro $n=375$ ot/min



Graf 5. 6 Závislost účinnosti na proudu pro n=600 ot/min

Závěr:

V grafu 5. 6. je vidět, že se křivky účinnosti liší a s rostoucím proudem se rozdíl zvětšuje, to je z největší pravděpodobnosti dáno mechanickými ztrátami stroje. Autor se v literatuře [19] zmiňuje o méně kvalitních ložiscích, na kterých se projevují ztráty větším zatížením a tím se snižuje účinnost. Graf 5.5 je velice podobný s rozdílem počátku křivky. Účinnost modelu leží mírně pod křivkou naměřených hodnot, což by se teoreticky nemělo stát, protože simulace nezahrnuje všechny vnější vlivy. Výraznější případ uvedeného problému je vidět na grafu 5.4, což by se dalo považovat za chybu a nesprávnost simulace. Je ale třeba vzít v potaz, že se jedná o stroj malého výkonu a tyto rozdíly jsou především v malých hodnotách. To při chybě měření nebo nepřesného nastavení simulace (například v podobě velkého kroku) může znamenat větší rozdíl v účinnosti, přičemž se jedná řádově o jednotky wattů. Lze tedy říci, že chyby se výrazněji projeví v malých hodnotách, naopak mechanické ztráty reálného generátoru se projeví až při větším zatížení. Odhadovaná nepřesnost napřesahuje hodnotu 10%. Proto lze považovat simulaci za odpovídající skutečnému generátoru.

5.5. Optimalizace

V této kapitole budou provedeny dva návrhy optimalizace magnetického obvodu a jejich analýza na vytvořeném modelu.

5.5.1. Změna velikosti vzduchové mezery

Zmenšením vzduchové mezery se zmenší rozptyl magnetického toku a taky jak je vidět ve vzorci (5.8). Zmenšováním mezery v ní narůstá magnetická indukce. Zmenšení mezery lze dosáhnout změnou v konstrukci přesnějším nastavením disků rotoru. Teoretickou hodnotu při zmenšení vzduchové mezery o 2mm lze určit ze vzorců v kapitole (4.4)

Plocha mezery je:

$$S_{\delta} = \pi \cdot (R_{out}^2 - R_{in}^2) = \pi \cdot (0,121^2 - 0,079^2) = 0,0263m^2 \quad (5.6)$$

Velikost vzduchové mezery $\delta = 0,024$ m při zmenšení o 2mm je její hodnota $\delta = 0,022$ m pak objem:

$$V_{\delta} = S_{\delta} \cdot \delta = 0,0263 \cdot 0,022 = 5,78 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (5.7)$$

Indukce v mezeře po jejím zmenšení:

$$B_{\delta} = \sqrt{\frac{(2 \cdot V_M) \cdot \mu_0 \cdot B_{M50} \cdot H_{M50}}{\frac{V_{\delta}}{16}}} = \sqrt{\frac{(2 \cdot 3,36 \cdot 10^{-6}) \cdot 1,2566 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 \cdot 9 \cdot 10^5}{\frac{5,786 \cdot 10^{-4}}{16}}} \quad (5.8)$$

$$= \sqrt{\frac{9,11 \cdot 10^{-6}}{3,61 \cdot 10^{-5}}} = \sqrt{0,252} = 0,502 T$$

Magnetický tok ve vzduchové mezeře

$$\phi_{max} = B_{\delta} \cdot S_{\delta} = 0,502 \cdot \frac{0,0263}{16} = 8,2510^{-4} Wb \quad (5.9)$$

Magnetický tok s uvažováním rozptylu, koeficient rozptylu bude v důsledku menší mezery také menší zvolil jsem hodnotu 1,8 pak:

$$\phi_{\delta} = \frac{\phi_{max}}{2} = \frac{8,25 \cdot 10^{-4}}{1,8} = 4,58 \cdot 10^{-4} Wb \quad (5.10)$$

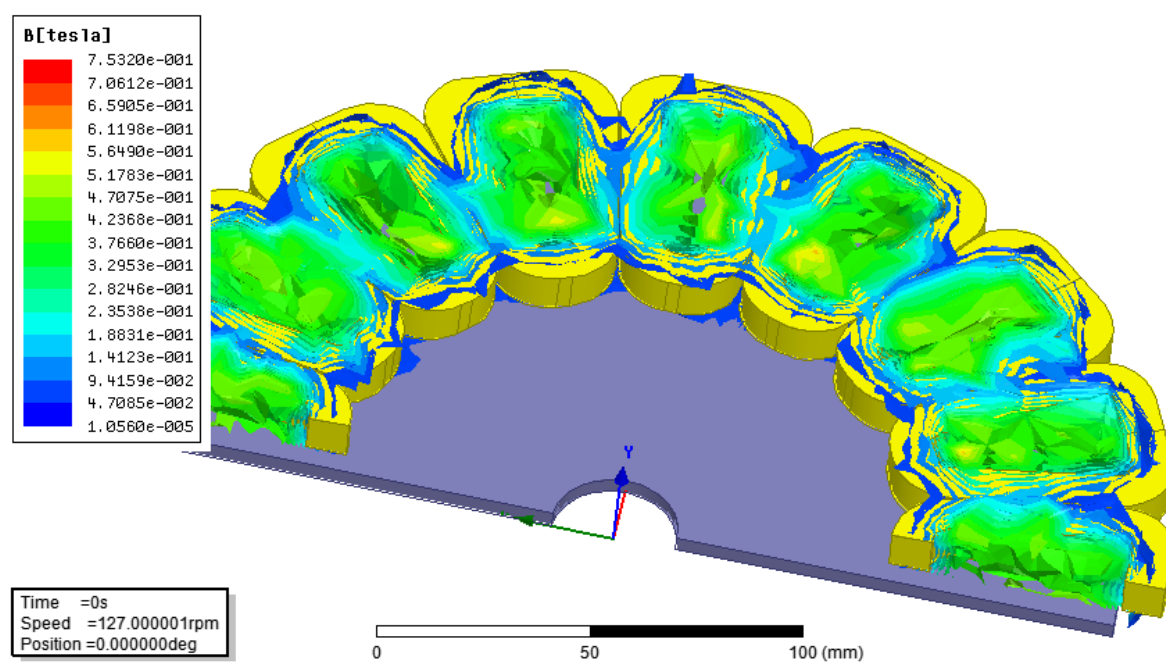
Indukované napětí:

$$U_i = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 464 \cdot 0,93 \cdot 3,86 \cdot 10^{-4} = 43,803 V \quad (5.11)$$

Efektivní hodnota napětí

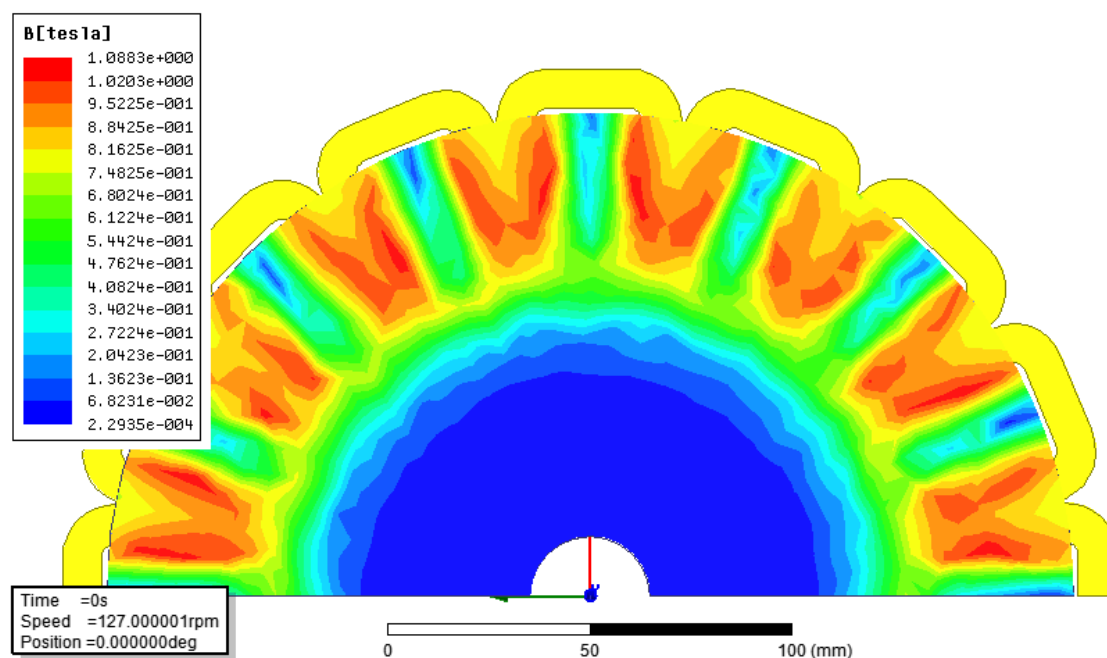
$$U_{ef} = \frac{U_i}{\sqrt{2}} = \frac{47,17}{\sqrt{2}} = 30,9 V \quad (5.12)$$

Simulace:



Obr. 5. 10 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Hodnota určená z obr 5.10 je přibližně 0,45 T oproti základnímu modelu u kterého byla odečtena hodnota 0,35T. Toto zlepšení znamená větší magnetický tok, indukované napětí a mělo by se pozitivně projevit na výsledné účinnosti stroje.



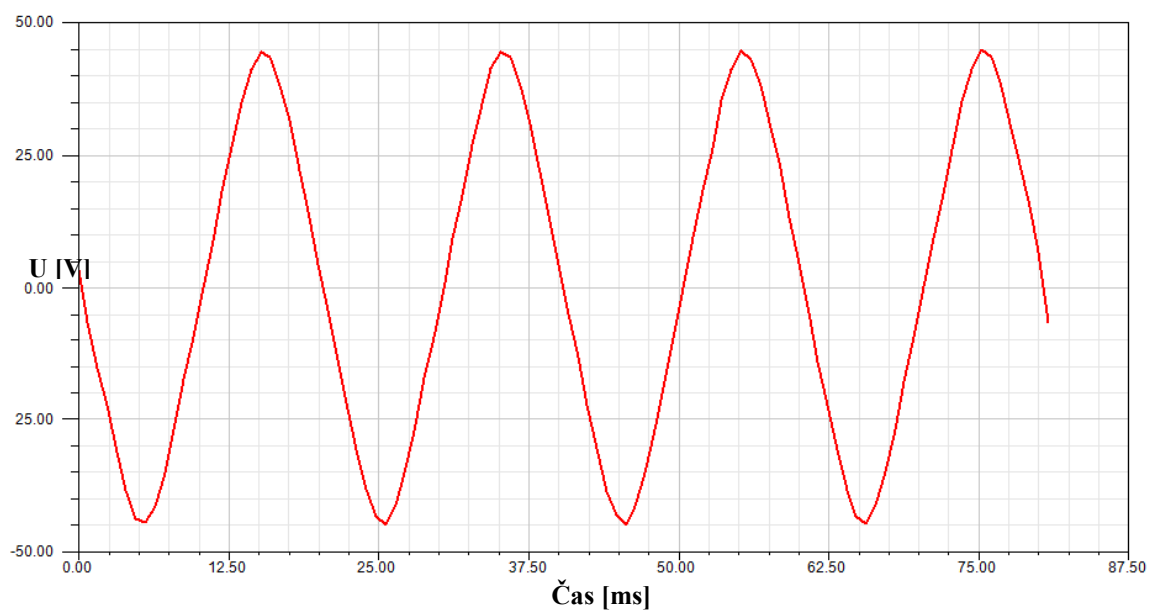
Obr. 5. 11 Indukce v disku rotoru

Po porovnání z obr 5. 7 lze usoudit, že se změna velikosti mezery neprojevila nikterak na indukci disku rotoru.

Nasimulované hodnoty napětí na prázdkno:

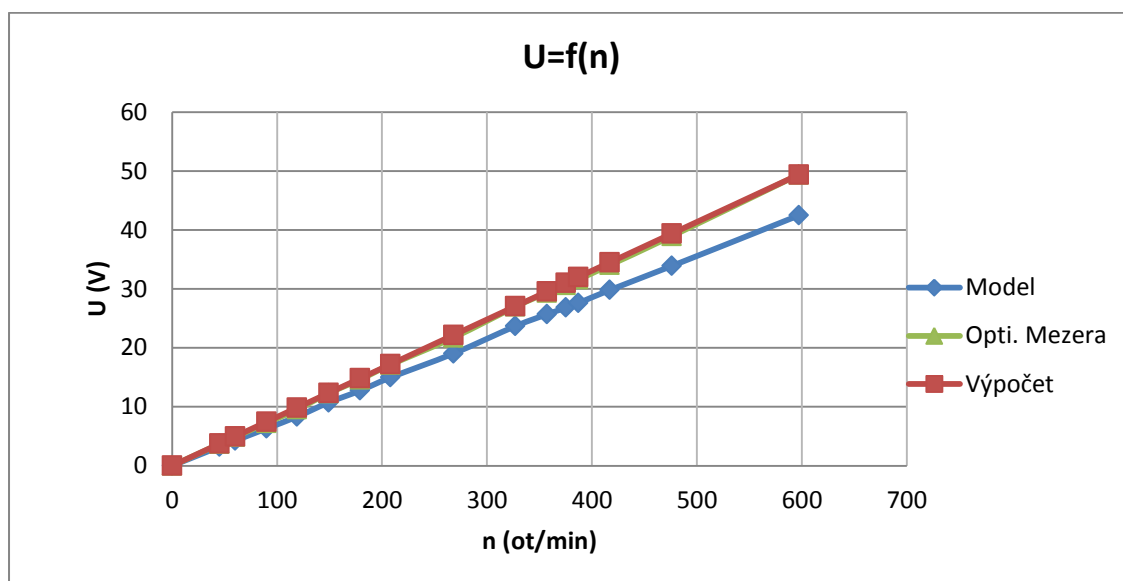
Tabulka 5. 9 Napětí na prázdkno

n (ot/min)	U (V) Optimalizace	U (V) Model	U (V) Výpočet
0	0	0	0
45	3,68	3,21	3,72
60	4,87	4,25	4,96
90	7,25	6,32	7,44
119	9,55	8,32	9,84
149	12,29	10,72	12,36
179	14,63	12,74	14,81
208	17,13	14,97	17,2
268	21,74	19,04	22,1
327	26,98	23,68	27
357	29,35	25,68	29,53
375	30,64	26,81	31,02
387	31,6	27,59	32,01
417	34,05	29,82	34,41
476	38,95	33,89	39,38
597	49,4	42,47	49,36



Obr. 5. 12 Průběh napětí na prázdko pro $n=375$ ot/min

Graf:



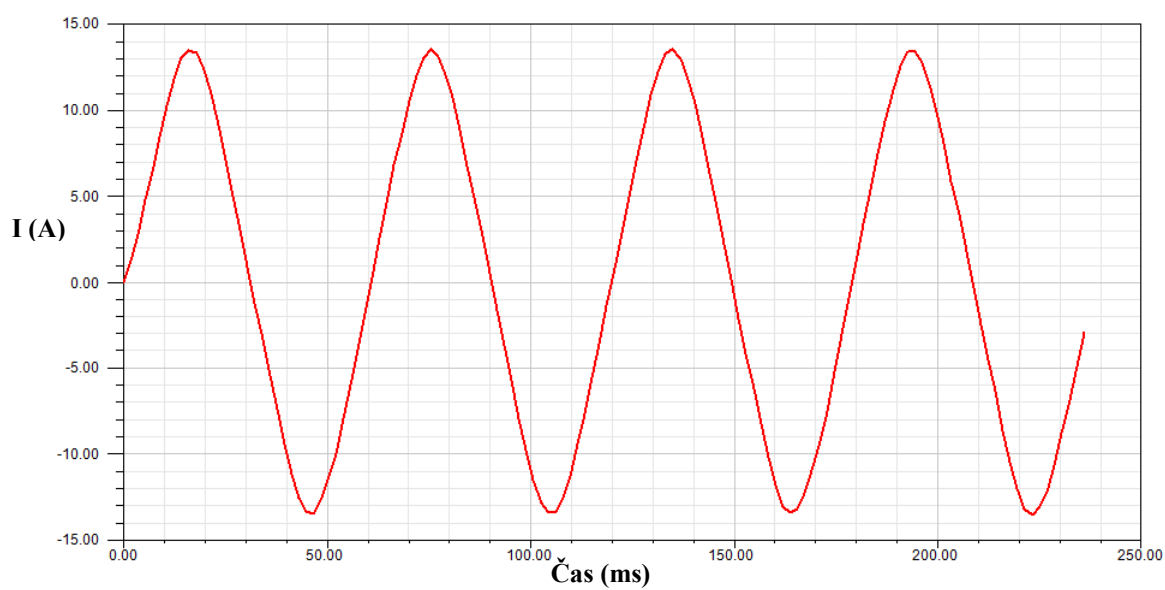
Graf 5. 7 Napětí na prázdko v závislosti na otáčkách

Z grafu je vidět změna napětí po optimalizaci v podobě vzduchové mezery při jmenovitých otáčkách dosahuje hodnoty 30,64V z původních 26,81V. Je vidí, že výpočet se simulací souhlasí.

Nasimulované hodnoty proudu na krátko:

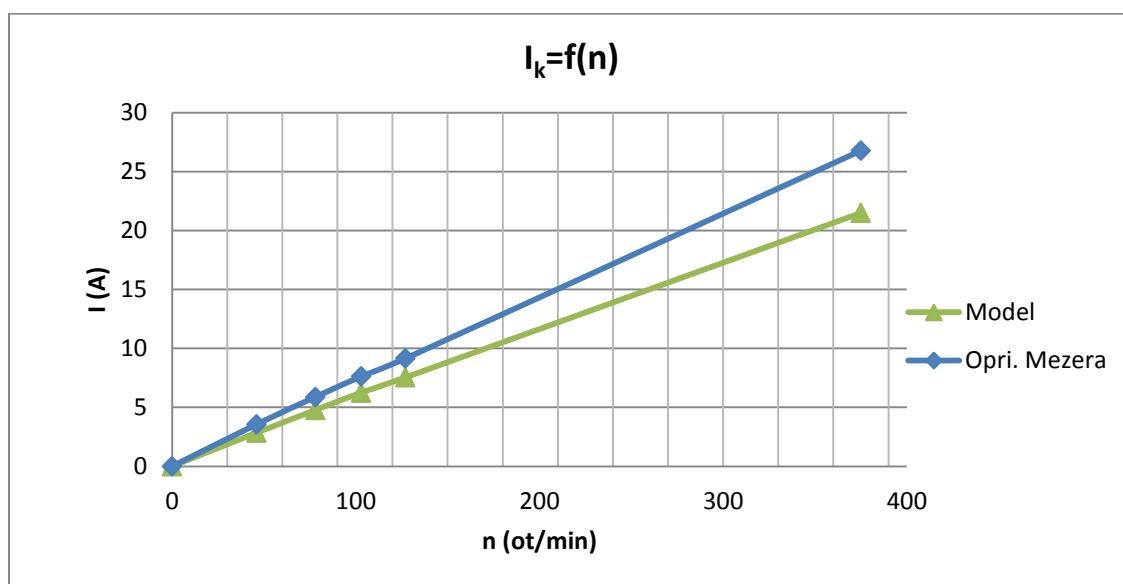
Tabulka 5. 10 Proudý na krátko

n (ot/min)	I_K (A) Optimalizace	I_K (A) Model
0	0	0
46	3,56	2,85
78	5,88	4,77
103	7,63	6,26
127	9,15	7,54
375	26,78	21,5



Obr. 5. 12 Průběh proudu na krátko pro $n = 127$ ot/min

Graf



Graf 5. 8 Proud na krátko v závislosti na otáčkách

V grafu je vidět jak změnila honota proudu na krátko díky změně vzdochové mezery.

Nasimulované hodnoty odporové zátěže:

Tabulka 5. 21 Hodnoty pro n=150 ot/min

n (ot/min)	U (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	Pp (W)	P (w)	η (%)
150	13,46	0,15	0,37	15,71	5,81	2,02	34,70
150	13,09	0,30	0,48	15,71	7,54	3,92	51,98
150	12,88	0,45	0,66	15,71	10,37	5,73	55,27
150	12,73	0,60	0,79	15,71	12,41	7,62	61,44
150	12,54	0,80	0,96	15,71	15,08	10,02	66,42
150	12,26	1,00	1,20	15,71	18,85	12,23	64,90
150	11,62	1,15	1,37	15,71	21,44	13,35	62,26
150	11,69	1,45	1,70	15,71	26,70	16,93	63,40
150	11,63	1,64	1,75	15,71	27,49	19,12	69,56
150	11,35	2,00	2,10	15,71	32,99	22,64	68,63

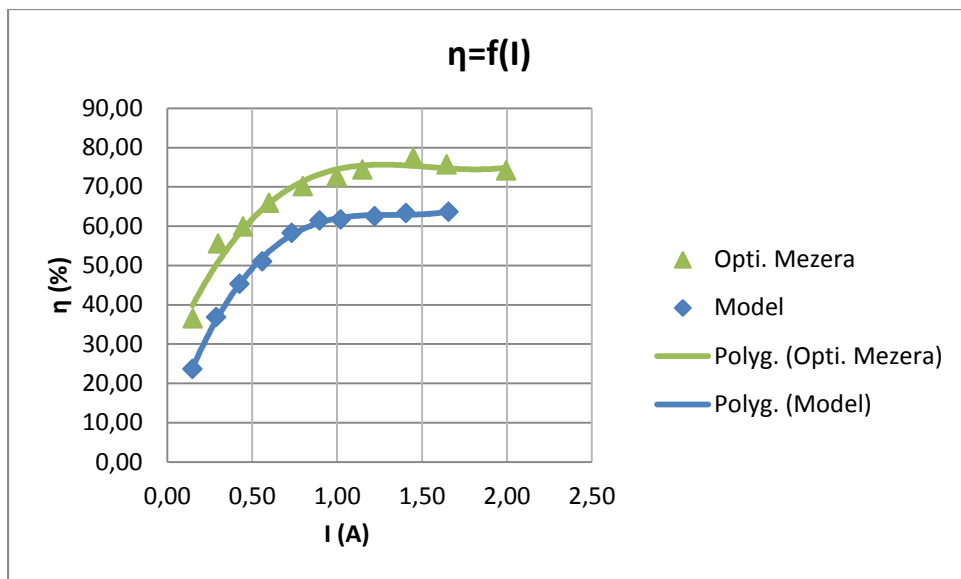
Tabulka 5. 32 Hodnoty pro $n=375$ ot/min

n (ot/min)	U (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
375	30,59	0,14	0,32	39,27	12,57	4,28	34,08
375	30,63	0,33	0,48	39,27	18,93	10,03	52,97
375	33,44	0,49	0,70	39,27	27,49	16,41	59,70
375	33,25	0,65	0,84	39,27	33,01	21,75	65,89
375	32,74	1,09	1,20	39,27	47,12	35,70	75,76
375	32,36	1,42	1,48	39,27	58,12	45,88	78,94
375	31,84	1,86	1,79	39,27	70,25	59,21	84,28
375	31,33	2,29	2,18	39,27	85,61	71,82	83,89

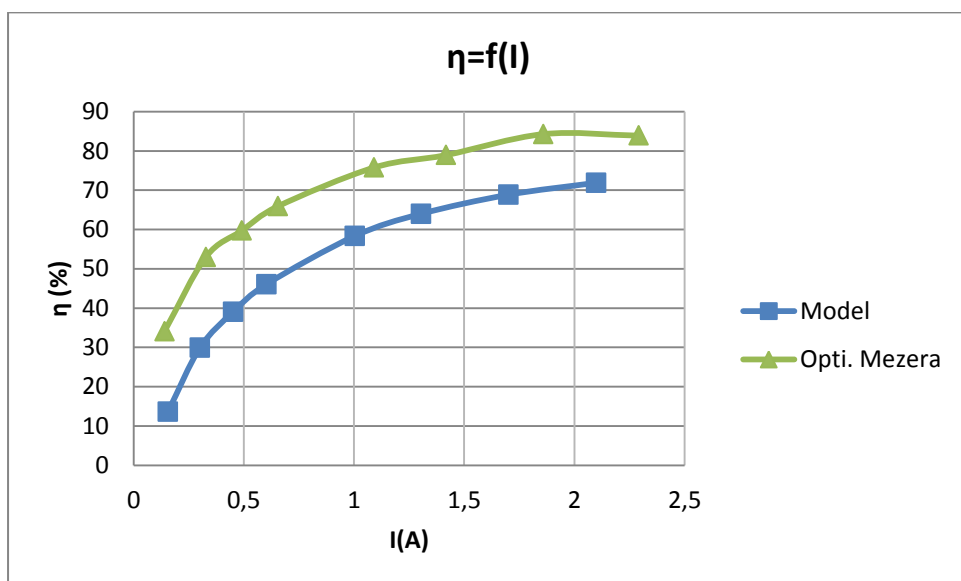
Tabulka 5. 13 Hodnoty pro $n=600$ ot/min

n (ot/min)	U (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
600	49,13	0,15	0,36	62,83	22,73	7,37	32,43
600	48,96	0,30	0,49	62,83	30,92	14,69	47,50
600	48,79	0,45	0,62	62,83	39,02	21,96	56,27
600	48,62	0,60	0,75	62,83	47,16	29,16	61,84
600	48,17	1,00	1,00	62,83	62,83	48,14	76,62
600	47,83	1,30	1,28	62,83	80,42	62,16	77,29
600	47,38	1,70	1,59	62,83	99,90	80,46	80,54
600	47,05	1,99	1,85	62,83	116,24	93,63	80,55

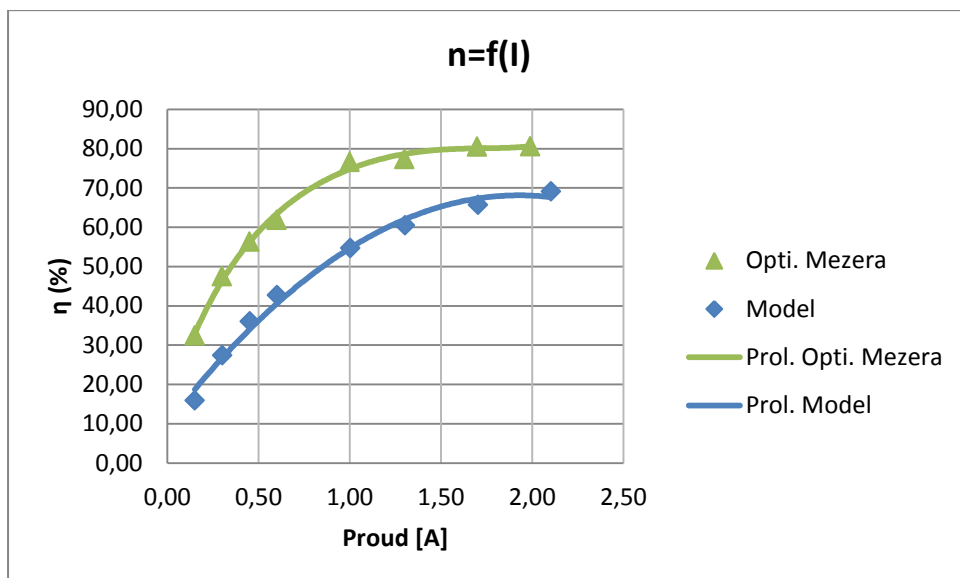
Grafy závislosti účinnosti na proudu.



Graf 5. 9 Závislosti účinnosti na proudu pro $n=150$ ot/min



Graf 5. 10 Závislost účinnosti na proudu pro $n= 375$ ot/min



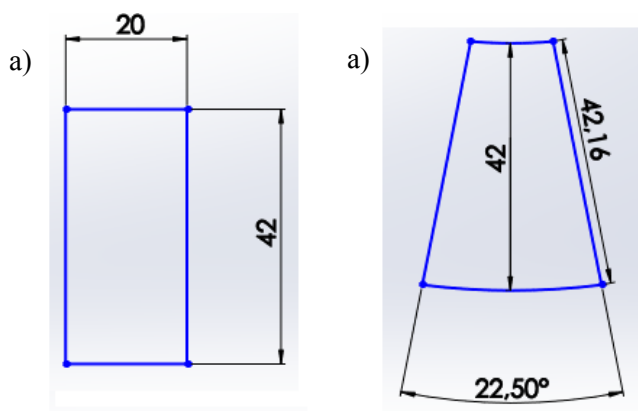
Graf 5. 11 Závislost účinnosti na proud pro $n=600$ ot/min

Závěr:

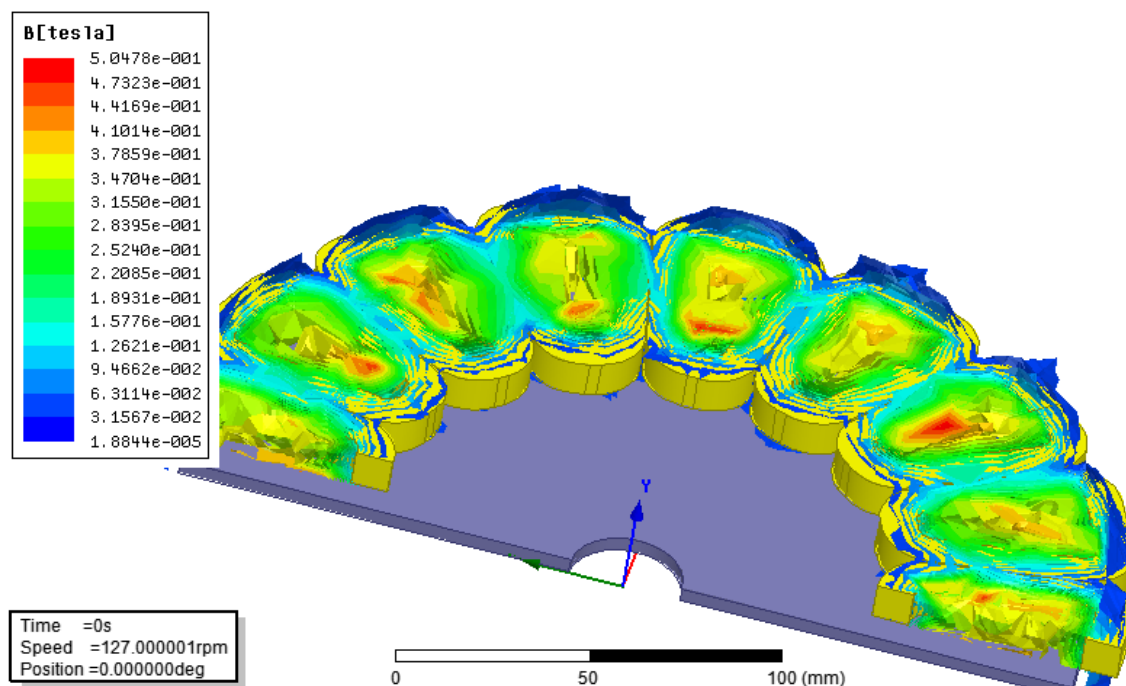
Z grafů je vidět, jak se projevuje zmenšení vzduchové mezery respektive její vliv na účinnost stroje. V grafech 5. 9 a 5. 10 je možné pozorovat, jak účinnost vzrostla stejně, podél celé zatěžovací charakteristiky. U grafu je 5. 11 je vidět větší odchylky v hodnotách 0,5A a 1A, ale ve výsledku se dá konstatovat, že zmenšení mezery má stejnoměrný vliv na účinnost stroje v celé jeho zatěžovací charakteristice.

5.5.3. Změna tvaru magnetu

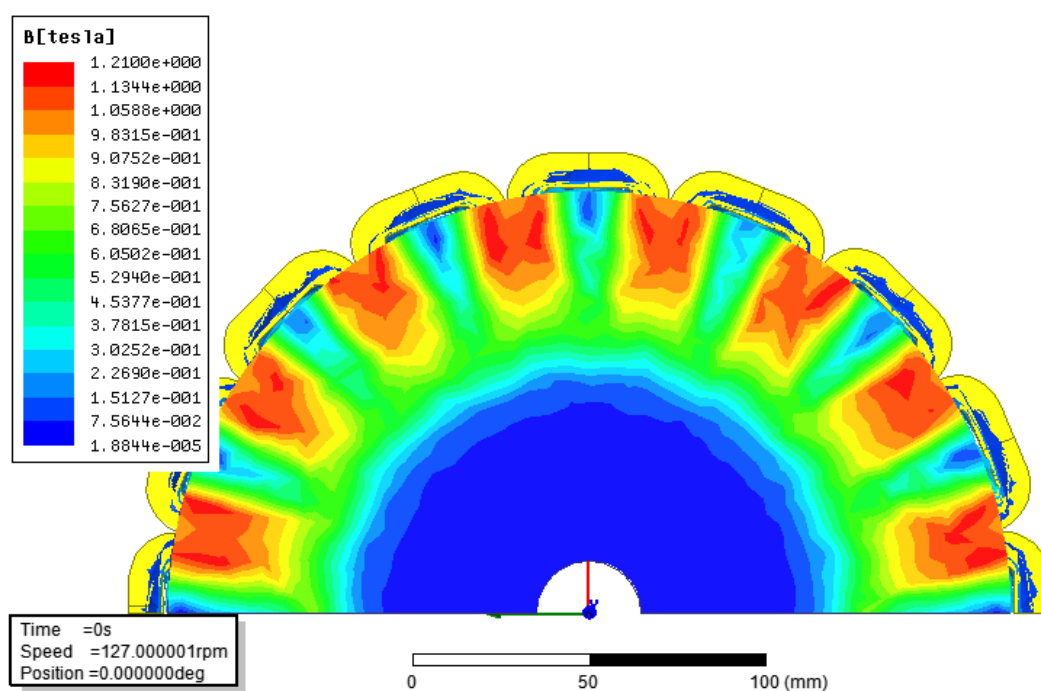
Tvar magnetu hraje důležitou roli, pokud chceme zachovat koeficient pólového krytí s rostoucí poloměrem. K tomu se používá magnet lichoběžníkového typu, což má vliv na velikost vzduchové mezery, indukovaném napětí a velikosti magnetického toku. Je třeba dbát na to, aby mezera mezi magnety (l_{mm}) nebyla menší, než je délka vzduchové mezery (δ) protože pak by se magnetický tok neuzavíral přes vzduchovou mezeru a tak neplnil svou funkci.



Obr. 5. 13 a) magnet použitý v modelu b) magnet navrhovaný pro optimalizaci



Obr. 5.14 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

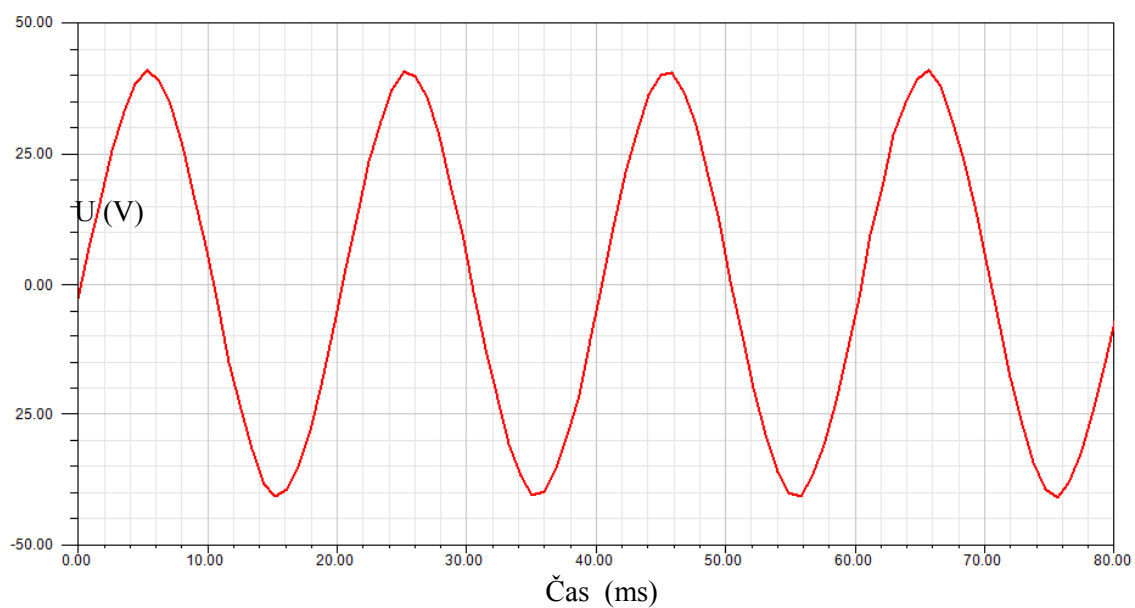


Obr. 5.15 Magnetická indukce v rotoru disku

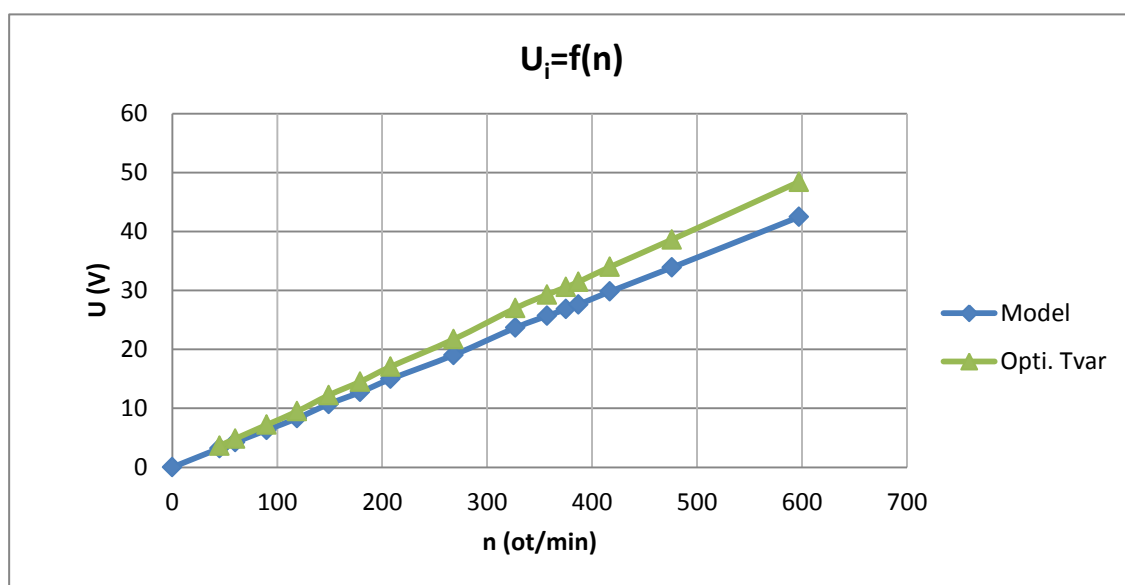
Napětí na prázdkno

Tabulka 5. 44 Napětí na prázdkno v závislosti na otáčkách

N (ot/min)	U (V) Optimalizace	U (V) Model
0	rms	0
45	3,66	3,21
60	4,85	4,25
90	7,20	6,32
119	9,48	8,32
149	12,22	10,72
179	14,52	12,74
208	17,07	14,97
268	21,71	19,04
327	27,00	23,68
357	29,28	25,68
375	30,56	26,81
387	31,45	27,59
417	33,99	29,82
476	38,63	33,89
597	48,42	42,47



Obr. 5. 16 Průběh napětí pro $n=357$ ot/min



Graf 5. 12 Napětí v závislosti na otáčkách

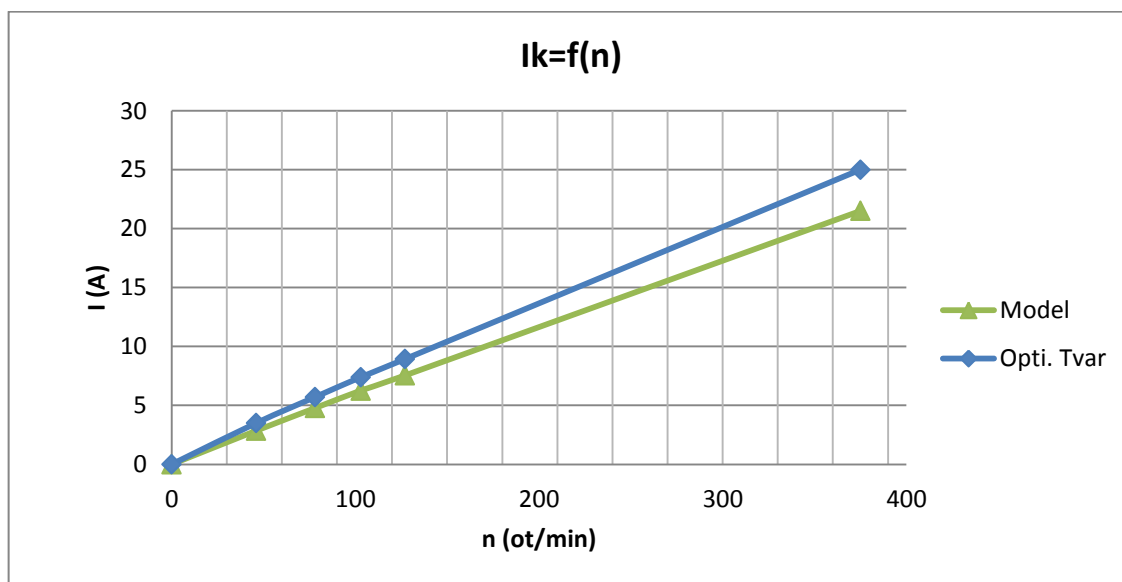
Závěr:

Stejně jak u vzduchové mezery se optimalizace tvarem magnetu projevila na napětí na prázdkno.

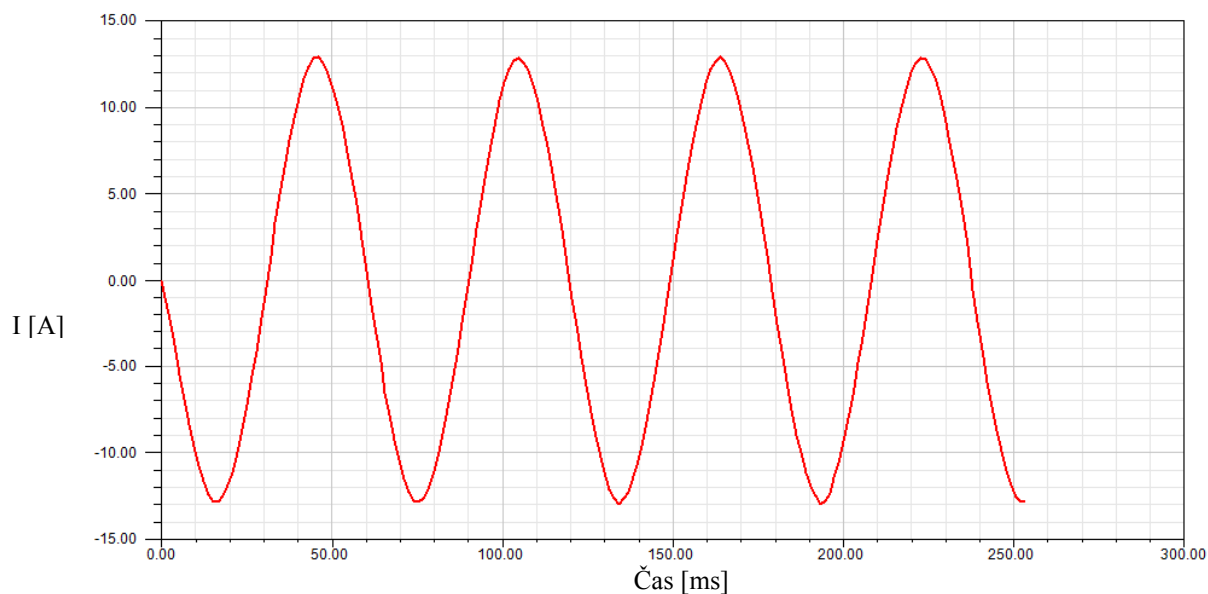
Proud na krátko

Tabulka 5. 55 Hodnoty proudu na krátko

n (ot/min)	I_k (A) Optimalizace	I_k (A) model
0	0	0
46	3,5	2,85
78	5,7	4,77
103	7,4	6,26
127	8,93	7,54
375	25	21,5



Graf 5. 13 Proud na krátko v závislosti na otáčkách



Obr 5.17 Průběh proudu pro $n=127$ ot/min

Závěr:

Na rozdíl od hodnot napětí je vidět z hodnoty proudu na krátko zlepšení hodnot. To znamená menší ztráty a větší účinnost.

Nasimulované hodnoty odporové zátěže:

Tabulka 5. 66 Hodnoty odporové zátěže pro $n=150$ ot/min (tvar magnetu)

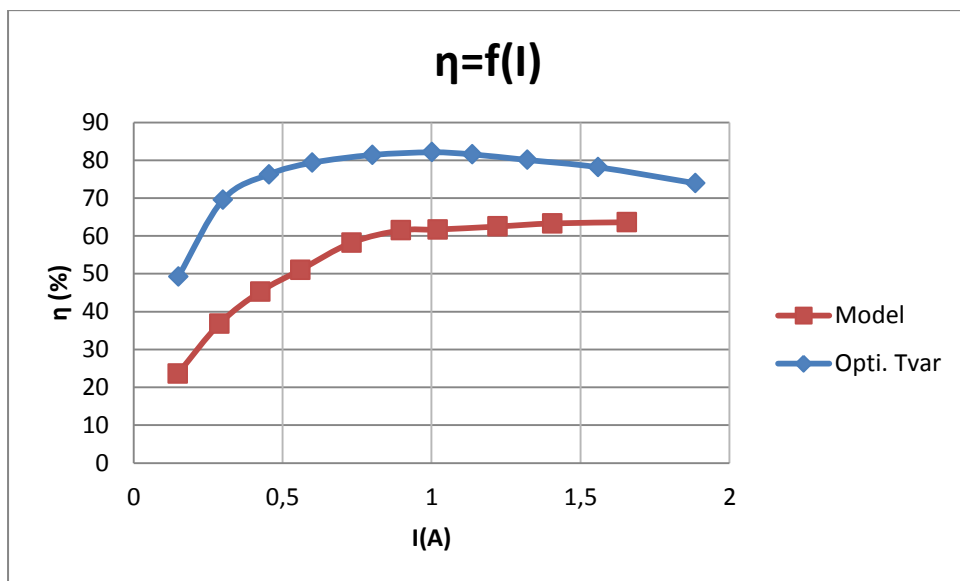
n (ot/min)	U (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
150	11,83	0,15	0,23	15,71	3,60	1,77	49,23
150	12,94	0,30	0,36	15,71	5,58	3,88	69,58
150	12,76	0,45	0,48	15,71	7,59	5,79	76,26
150	12,59	0,60	0,61	15,71	9,51	7,55	79,34
150	12,36	0,80	0,78	15,71	12,18	9,91	81,40
150	12,13	1,00	0,94	15,71	14,80	12,15	82,10
150	11,23	1,14	1,00	15,71	15,64	12,75	81,55
150	11,05	1,32	1,16	15,71	18,23	14,60	80,08
150	10,78	1,56	1,37	15,71	21,50	16,80	78,16
150	10,41	1,89	1,69	15,71	26,55	19,63	73,93

Tabulka 5. 77 Hodnoty odporové zátěže pro $n=375$ ot/min (tvar magnetu)

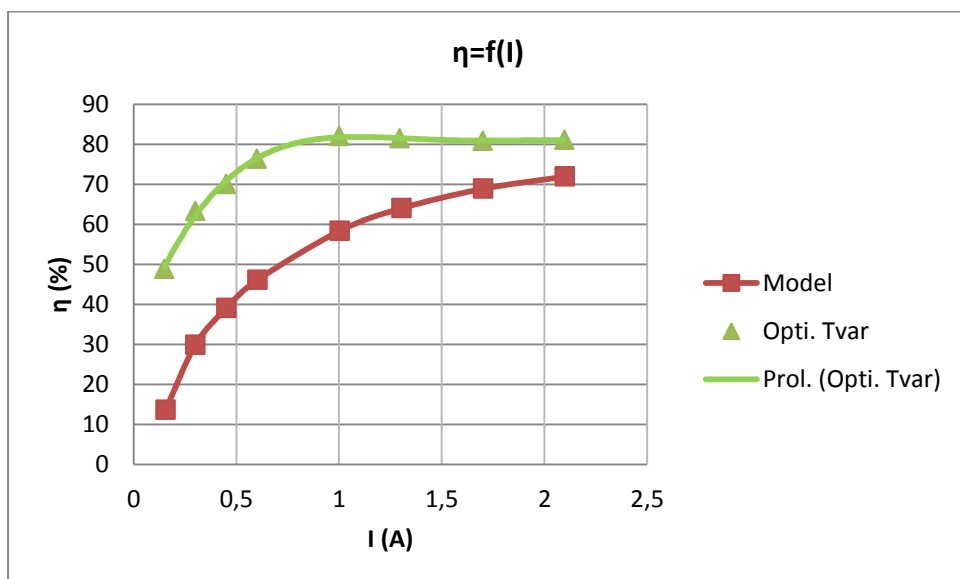
n (ot/min)	U (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
375	29,96	0,15	0,23	39,27	9,21	4,49	48,78
375	29,79	0,30	0,36	39,27	14,13	8,94	63,27
375	29,62	0,45	0,48	39,27	19,03	13,33	70,03
375	29,45	0,60	0,59	39,27	23,17	17,68	76,31
375	29,00	1,00	0,90	39,27	35,34	28,99	82,03
375	28,67	1,29	1,16	39,27	45,55	37,11	81,46
375	28,21	1,70	1,51	39,27	59,30	47,94	80,85
375	27,76	2,10	1,83	39,27	71,86	58,22	81,01

Tabulka 5. 8 Hodnoty odporové zátěže pro $n=600$ ot/min (tvar magnetu)

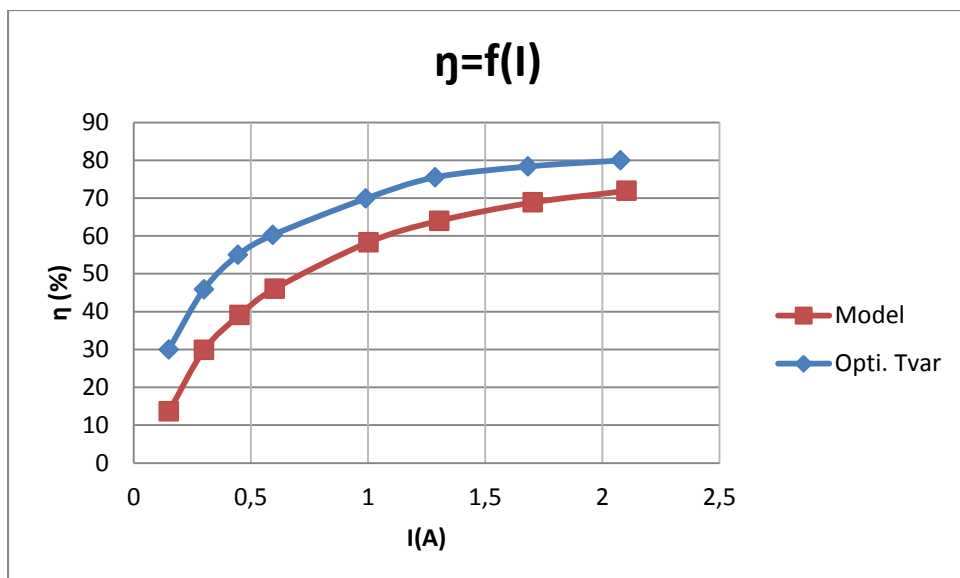
n (ot/min)	U (V)	I (A)	M (Nm)	ω (rad/s)	P_p (W)	P (w)	η (%)
600	48,83	0,15	0,39	62,83	24,35	7,30	29,98
600	48,66	0,30	0,51	62,83	31,84	14,59	45,84
600	48,50	0,45	0,63	62,83	39,33	21,61	54,96
600	48,33	0,59	0,76	62,83	47,65	28,71	60,24
600	47,88	0,99	1,08	62,83	67,86	47,40	69,85
600	47,55	1,29	1,29	62,83	81,05	61,17	75,47
600	47,10	1,68	1,61	62,83	101,16	79,26	78,35
600	46,65	2,08	1,93	62,83	121,27	96,95	79,95



Graf 5. 14 Závislost účinnosti na proudu pro 1500t/min



Graf 5. 15 Závislost účinnosti na proudu pro 3750t/min



Graf 5. 16 Závislost účinnosti na proudu pro 600ot/min

Závěr:

V grafech se zatěží je vidět že tvar magnetu působí zlepšením podél délky zátěžové charakteristiky . Díky vytvoření pro otáčky v 375 a 150 má také od jednoho ampéru přibližně lineární charakteristiku, díky čemuž může pracovat s maximální možnou účinností ve větším rozsahu otáček, což je zejména pro větrné elektrárny výhodný, protože nepracují s konstantními otáčkami, Účinnost optimalizace je menší než u vduchové mezery ale má jiný charakter v oblasti zátěžové křivky.

6. Závěr

V práci jsou popsány základní druhy axiálních generátorů a jejich různé konstrukce. Na základě jejich výhod a nevýhod vychází jako nejvhodnější konstrukce s dvojitým vnějším rotorem a statorem bez železného jádra. Návrh stroje byl tvořen na základě skutečného modelu, jehož parametry byly ověřeny výpočtem. Poté byl v softwarovém prostředí programů Ansys Maxwell a SolidWorks vytvořen počítačový model axiálního stroje. Správnost tvorby modelu byla ověřována porovnáním s naměřenými hodnotami proudu na krátko, napětí na prázdko a zatěžovací odporovou charakteristikou. Bylo ukázáno, že model dobře simuluje skutečné parametry stroje.

Po ověření a zhodnocení vytvořeného modelu byly navrženy dvě optimalizace magnetického obvodu ke zlepšení účinnosti stroje. První byla optimalizace změnou velikosti vzduchové mezery a druhá změnou tvaru magnetů. Obě přinesly zlepšení celkové účinnosti stroje. Změna vzduchové mezery je proveditelná u axiálního stroje mechanicky nastavením rotoru. Změna velikosti vedla, ke konstantnímu zlepšení účinnosti nezávisle na hodnotě zatěžovacího proudu. To je velkým přínosem pro větrné elektrárny, protože pracují s proměnlivými otáčkami, což při konstantní zátěži vede ke změně zatěžovacího proudu. Zlepšení se projevilo třinácti procenty účinnosti, což je poměrně velká hodnota zlepšení k náročnosti na provedení změny. Pro jednotlivce tato změna může být levnou optimalizací, která stojí jen čas nebo promyšlenější návrh. Ve větším objemu výroby tato změna může znamenat už podstatné náklady související s náradím, časem a potřebnými přípravky. Z této optimalizace je vidět, že je třeba dbát na provedení konstrukce, za účelem dosažení co nejmenší vzduchové mezery. Změněným tvarem magnetů se docílilo menšího zlepšení účinnosti jako u první optimalizace, ale křivka vykazovala určitou linearitu při změnách zatěžovacího proudu. Toho bylo dosaženo rovnoměrnějším rozložením magnetického pole uvnitř mezery. To je opět výhodné pro větrné elektrárny, které pak mohou při jistém rozmezí pracovat z maximální možnou účinností generátoru. Protože s magnety se nedají jednoduše a levně změnit jako vzduchová mezera je dobré s touto optimalizací počítat už při samotném návrhu stroje.

Nabízí se ještě mnoho dalších možností optimalizací magnetického obvodu stroje, pro získání co možná nejlepší účinnosti. K tomu, jak se v práci ukázalo, je vhodné použít simulačních programů, které sníží čas na analýzu optimalizace, ale také náklady z konstrukcí, měření, materiálem a případným zničením optimalizovaného prototypu. Tyto poznatky mohou být rozpracovány v dalších pracích, které budou navrhovat jiné optimalizace nebo jejich kombinace. Je možné se zabývat změnou materiálů magnetů či samotného stroje, efektivností jednotlivých kombinací z hlediska na pořizovací ceně nebo účinnosti

Použitá literatura

- [1]: CHMELÍK Karel . Asynchronní a synchronní Elektrické stroje . 1. . Vyd. . Ostrava : .Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava , 2002 ISBN 80-248-0025- X
- [2]: Kopylov , I. , P. : . Stavba Elektrických STROJŮ , SNTL , Praha , 1988 , ISBN 978-0-470-69516-6
- [3]: GIERAS JF , WANG R. , Kämper MJ axiální tok permanentního magnetu střídavý stroj . Nizozemsko : Kluwer akademické nakladatelství , 2004 , ISBN 1-4020-2720-6
- [4]: HRABOVCOVÁ , V. : Moderní Elektrické stroje . Žilina , 2001 , ISBN 80-7100-809-5
- [5]: Kačor , Petr . Vybrané typy Elektrických STROJŮ . 1. . Vyd. . Ostrava : . VŠB - TU Ostrava , 2010 ISBN 978-80-248-2169-6
- [6]: SOKOL , Petr Kopřiva . Měření na axiálním generátoru Malého výkonu . Ostrava , 2012 . Bakalářská práce . VŠB . Vedoucí práce Ing . Petr Kačor , Ph.D.
- [7]: CIGÁNEK , L. ; Stavba Elektrických STROJŮ . 1. . Vyd. . Praha : SNTL . , 1958 714 s.
- [8]: Okol , Martin . Navrh synchronního stroje s permanentními magnty . Plzeň , 2012 . Diplomová práce . Západočeská univerzita v Plzni . Vedoucí práce Ing.Karel Hruška .
- [9]: DION GENERATOR SOLURION . DGS - Dion generátor řešení [online] . DGS , © 2012 [cit . 2012-11-24] . Dostupné z <http://www.diongenerators.com/knowledge-is-power/>
- [10]: HANSELMANNH Duane C. , Brushless Permanent - Magnet Motor Design, University of Maine Orono , Maine , ISBN 0-07-026025-7
- [11]: C & F GREEN ENERGY . C & F Zelená energie [online] . C & F Zelená energie , © 2013 [cit . 2013-01-22] . Dostupné z <http://www.cfgreenenergy.com/>
- [12]: BRUSH SEM . BRUSH SEM [on-line] . BRUSH SEM , © 2012 [cit . 2012-11-23] . Dostupné z <http://www.brush-sem.cz/>
- [13]: BENEŠ , Kryštof . VÝVOJ synchronních STROJŮ . PLZEŇ , 2013 . Bakalářská práce . Západočeská UNICITANIVERZITA v Plzni . Vedoucí práce Ing . Michala Vachtlová
- [14]: PAVLÁČEK , Petr ledna navrh synchronního Motorů s permanentními magnety . Brno, 2012 . Bakalářská práce . Vysoké technické učení technické v Brně . Vedoucí práce Ing Rostislav Huzlík .
- [15]: [Http : / / www.supermagnety.cz/](http://www.supermagnety.cz/) . [on-line] . [cit . 2014-05-8] . Dostupné z : <http://www.supermagnety.cz/cz/64/teoreticky-uvod/>
- [16]: Bartoš V. , Červený J. , Hruška J. , Kotlanová A. , Skala B. , Elektrické stroje , Plzeň 2006, ISBN 80-7043-444-9
- [17]: [Http : / / www.abcmagnet.cz/](http://www.abcmagnet.cz/) . [on-line] . [cit . 2014-05-8] . Dostupné z <http://www.abcmagnet.cz/technologie-vyroby.php>

- [18]: [Http :// www.neomag.cz/](http://www.neomag.cz/) . [on-line] . [cit . 2014-05-8] . Dostupné z <http://www.neomag.cz/cz/katalog/>
- [19]: Šamaj , Antonín . Měření na synchronním generátoru Malého výkonu . Ostrava, 2013 .
Bakalářská práce . VŠB . Vedoucí práce Ing.Petr Kačor , Ph.D.
- [20]: Maxwell . [Http :// www.svsfem.cz](http://www.svsfem.cz) [on-line] . [cit . 2012-05-04] . Dostupné z :
<http://www.svsfem.cz/content/maxwell>
- [21]: Gieras J.F. , a Wing M. (2002) . Permanentní magnet technologie motoru :
konstrukce a aplikace . 2. ed. , Marcel Dekker , New York .

Seznam obrázků

- [Obr.2.1] První komerční 3fázový generátor [13]
- [Obr.2.2] Motorický režim synchronního stroje [8]
- [Obr.2.3] Rotor synchronního turboalternátoru [14]
- [Obr.2.4] Rotor hydroalternátoru umístěného na přehradě Lipno
- [Obr.3.1] Hysterezní smyčka
- [Obr.3.2] Nabízené tvary magnetů [18]
- [Obr.3.3] Vývoj materiálů permanentních magnetů v závislosti na $(BH)_{\max}$ [4]
- [Obr.3.4] BH křivka pro Křemíkovou ocel a Somaloy
- [Obr.4.1] Ukázka a) radiální stroj s permanentními magnety b) axiální stroj s permanentními magnety [3]
- [Obr.4.2] Ukázka možných uložení magnetů
- [Obr.4.3] Základní konstrukce axiálního stroje [3]
- [Obr.4.4] Magnetický tok strojem s oboustranným rotorem zobrazený ve 2D [3]
- [Obr.4.5] Magnetický tok strojem v oboustranném rotoru zobrazený ve 2D rovině [3]
- [Obr.4.6] Segment jádra statoru vyrobeného z ocelového pásku. 1 – ocelový pásek, 2 – drážka, 3 – složení pásku, 4 – slisovaný pásek, 5 – kompletní segment
- [Obr.4.7] Statory pro malé jednostranné axiální motory vyrobeny z práškových materiálů
- [Obr.4.8] Tvary magnetů na diskovém rotoru: a) lichoběžníkový, b) kruhový, c) půlkruhový [3]
- [Obr.4.9] Vinutí statoru: a) uložené v železném jádře b) zalité v epoxidu
- [Obr.5.1] Dvojitý vnější motor
- [Obr.5.2] Kompletní generátor se statorovým vynutím zalitým v epoxidové pryskyřici
- [Obr.5.3] a) vytvořená 2D skica cívky b) cívka po převedení do 3D
- [Obr.5.4] Řez kompletním modelem generátoru
- [Obr.5.5] Ukázka použité sítě pro simulaci
- [Obr.5.6] Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
- [Obr.5.7] Indukce v disku rotoru
- [Obr.5.8] Průběh napětí na prázdno pro $n=375$ ot/min
- [Obr.5.9] Průběh proudu na krátko pro $n=127$ ot/min

[Obr.5.10] Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

[Obr.5.11] Indukce v disku rotoru

[Obr.5.12] Průběh napětí na prázdko pro $n=375$ ot/min

[Obr.5.13] Průběh proudu na krátko pro $n=127$ ot/min

[Obr.5.14] Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

[Obr.5.15] Magnetická indukce v rotoru disku

[Obr.5.16] Průběh proud po změně tvaru magnetu

[Obr.5.17] Proud na krátko

Seznam tabulek

- [Tabulka 3.1] Magnetické vlastnosti AlNiCo pro vybrané typy [17]
- [Tabulka 3.2] Magnetické vlastnosti – Ferity pro vybrané typy [17]
- [Tabulka 3.3] Magnetické vlastnosti - SmCo pro vybrané typy [17]
- [Tabulka 3.4] Magnetické vlastnosti - NdFeB pro vybrané typy [17]
- [Tabulka 4.1] Hodnoty počtu cívek v závislosti na počtu pólů pro 3f vynutí
- [Tabulka 5.1] Hodnoty napětí v závislosti na otáčkách
- [Tabulka 5.2] Hodnoty proudu na krátko
- [Tabulka 5.3] Namodelované hodnoty odporové zátěže pro $n=150$ ot/min
- [Tabulka 5.4] Naměřené hodnoty odporové zátěže pro $n=150$ ot/min [4]
- [Tabulka 5.5] Namodelované hodnoty odporové zátěže pro $n=375$ ot/min
- [Tabulka 5.6] Naměřené hodnoty odporové zátěže pro $n=375$ ot/min [4]
- [Tabulka 5.7] Namodelované hodnoty odporové zátěže pro $n=600$ ot/min
- [Tabulka 5.8] Naměřené hodnoty pro $n=600$ ot/min [4]
- [Tabulka 5.9] Napětí na prázdko
- [Tabulka 5.10] Proudů na krátko
- [Tabulka 5.11] Hodnoty pro $n=150$ ot/min
- [Tabulka 5.12] Hodnoty pro $n=375$ ot/min
- [Tabulka 5.13] Hodnoty pro $n=600$ ot/min
- [Tabulka 5.14] Napětí na prázdko v závislosti na otáčkách
- [Tabulka 5.15] Hodnoty proudu na krátko
- [Tabulka 5.16] Hodnoty odporové zátěže pro $n=375$ ot/min (tvar magnetu
- [Tabulka 5.17] Hodnoty odporové zátěže pro $n=375$ ot/min (tvar magnetu)
- [Tabulka 5.18] Hodnoty odporové zátěže pro $n=600$ ot/min (tvar magnetu)

Seznam grafů

[Graf 5.1] Procentuální odchylka modelu a výpočtu od naměřených hodnot.

[Graf 5.2] Závislost napětí na otáčkách

[Graf 5.3] Proud na krátko v závislosti na otáčkách

[Graf 5.4] Závislost účinnosti na proudu pro $n=150$ ot/min

[Graf 5.5] Závislost účinnosti na proudu pro $n=375$ ot/min

[Graf 5.6] Závislost účinnosti na proudu pro $n=600$ ot/min

[Graf 5.7] Napětí na prázdko v závislosti na otáčkách

[Graf 5.8] Proud na krátko v závislosti na otáčkách

[Graf 5.9] Závislosti účinnosti na proudu pro $n=150$ ot/min

[Graf 5.10] Závislost účinnosti na proudu pro $n=375$ ot/min

[Graf 5.11] Závislost účinnosti na proud pro $n=600$

[Graf 5.12] Napětí v závislosti na otáčkách

[Graf 5.13] Proud na krátko v závislosti na otáčkách

[Graf 5.14] Závislost účinnosti na proudu pro 150ot/min

[Graf 5.15] Závislost účinnosti na proudu pro 375ot/min

[Graf 5.16] Závislost účinnosti na proudu pro 600ot/min

Seznam příloh

[Příloha 1] Výkres statoru

[Příloha 2] Výkres disk rotoru

[Příloha 3] Výkres magnet

[Příloha 4] Výkres magnet 2

[Příloha 5] Výkres cívky

[Příloha 6] Výkres sestava statoru

[Příloha 7] Výkres sestava rotoru 1

[Příloha 8] Výkres sestava rotoru 2

[Příloha 9] Výkres generátor sestava 1

[Příloha 10] Výkres generátor sestava 2

[Příloha 11] Materiálový list magnet NdFeB 35